



BACHELORARBEIT

Herr
Jannis Kern

**Dynamikumfang digitaler
Filmkameras**

2018

BACHELORARBEIT

Dynamikumfang digitaler Filmkameras

Autor:
Herr Jannis Kern

Studiengang:
Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:
MG14w3-V

Erstprüfer:
Herr Prof. Dipl. Toningenieur Mike Winker

Zweitprüfer:
Herr Philipp Grimm, B.Eng.

Einreichung:
Leipzig, 08.02.2018

BACHELOR THESIS

Dynamic Range of digital Filmcameras

author:

Mr. Jannis Kern

course of studies:

Media and Acoustical Engineering

seminar group:

MG14w3-V

first examiner:

Mr. Prof. Dipl. Soundengineer Mike Winkler,

second examiner:

Mr. Philipp Grimm, B.Eng.

submission:

Leipzig, 08.02.2018

Vielen Dank für die technische und freundliche Unterstützung an:

Philipp Grimm, B.Eng
Ludwig Kameraverleih GmbH in Leipzig
Martin Lobst und die VISIXgroup GmbH

Bibliografische Angaben

Kern, Jannis

Dynamikumfang digitaler Filmkameras

Dynamic Range of digital Filmcameras

58 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2018

Abstract

Auflösungen wie 4K oder 8K werden dafür eingesetzt eine höhere Qualität von bewegten Bildern zu suggerieren. Doch ist ein hochauflösendes Bild auch in qualitativer Hinsicht gleich ein „besseres“ Bild? Die vorliegende Arbeit gibt Aufschluss darüber, welche Rolle der Dynamikumfang für die Qualität von bewegten Bildern spielt. Hierfür werden vorangehend die Grundlagen sowie notwendige Termini der entscheidenden Parameter bezüglich des Dynamikumfangs erläutert. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf den Herstellern ARRI, RED und SONY, welche jeweils durch ihre eigenen Technologien Dual Gain, HDRx und S-Log2 sowie S-Log3 verschiedene Herangehensweisen zur Steigerung des Dynamikumfangs anbieten. Abschluss bildet ein vom Verfasser selbst durchgeführter Kamertest der genannten Hersteller, um herauszufinden welche Technologie den höchsten Dynamikumfang leisten kann.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Formelverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
1 Einleitung	1
1.1 Thema der Arbeit.....	1
1.2 Ziel, Aufbau und Methodik der Arbeit	2
2 Die Filmkamera	3
2.1 Die 35mm Filmkamera	3
2.2 Die digitale Filmkamera	4
2.2.1 Sensorenarten.....	5
2.2.2 Farbdetektierung	9
2.2.3 Signalverarbeitung	10
3 Dynamikumfang	13
3.1 Definition Dynamikumfang.....	13
3.2 Das menschliche Sehen.....	14
3.3 Dynamikumfang in der Videografie	15
4 Linear, Log und Gamma.....	17
4.1 Linear.....	17
4.2 Gamma-Kurven	18
4.2.1 Entwicklung der Gamma-Kurven	18
4.2.2 Recommendation ITU-R BT.709.....	20
4.2.3 Weiterentwicklungen von Rec.709.....	21
4.3 Logarithmische Kurven.....	21
4.3.1 SONY S-Log	25
4.3.2 ARRI LogC.....	26
4.3.3 RED Log3G10.....	27

5	High-Dynamic-Range (HDR)	29
5.1	HDR in der Fotografie.....	30
5.2	HDR in der Videografie.....	31
5.2.1	Dual Gain Technologie von ARRI	32
5.2.2	HDRx von RED Digital Cinema.....	33
6	Kameravergleich	35
6.1	Die verwendeten Kameras	35
6.1.1	ARRI ALEXA XT Plus	35
6.1.2	RED EPIC-W.....	36
6.1.3	SONY PWM-F5.....	37
6.2	Der Versuchsaufbau	38
6.2.1	Vergleich des Dynamikumfangs via Testchart	38
6.2.2	Szenischer Test	43
6.3	Auswertung.....	45
6.3.1	Testchart	45
6.3.2	Szenischer Test	54
7	Schlussbetrachtung	58
	Literaturverzeichnis	XI
	Anlagen	XIV
	Eigenständigkeitserklärung	XLI

Abkürzungsverzeichnis

AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiconductor
CR	Contrast Ratio
CRT	Cathode Ray Tube
dB	Dezibel
DR	Dynamic Range
EOTF	Electro-Optical-Transfer Function
EV	Exposure Value
FPN	Fixed Pattern Noise
FPS	Frames Per Second / Bilder pro Sekunde
HDR	High Dynamic Range
HVS	Human Visual System
ITU	International Telecommunication Union
JND	Just Noticeable Difference
LUT	Lookup Table
OETF	Opto-Electrical-Transfer Function
SDR	Standard Dynamic Range
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Signal-Rausch-Abstand)
WFM	Waveform-Monitor

Formelverzeichnis

Formel 1: Technische Definition: Dynamikumfang.....	13
Formel 2: Umrechnung: Exposure Value zu Contrast Ratio	14
Formel 3: Umrechnung: Contrast Ratio zu Exposure Value	14
Formel 4: Übertragungsfunktion Rec. 709	20
Formel 5: Übertragungsfunktion S-Log2	25
Formel 6: Übertragungsfunktion S-Log3	26
Formel 7: Übertragungsfunktion LogC	27
Formel 8: Übertragungsfunktion Log3G10	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prismenblock zur Farbtrennung für drei Sensoren (vom Verfasser bearbeitet)	9
Abbildung 2: Der Bayer-Farbfiler.....	10
Abbildung 3: Graukeil mit einem Dynamikumfang von 13:1	13
Abbildung 4: Gamma-Vorentzerrung und CRT-Gamma	19
Abbildung 5: Lineares Abtasten	23
Abbildung 6: Logarithmisches Sampling	24
Abbildung 7: Grafische Darstellung von S-Log2 und S-Log3.....	26
Abbildung 8: Die Log-Kurven der unterschiedlichen EI von ARRI LogC.....	27
Abbildung 9: Verteilung der 14 Stops bei unterschiedlichen Belichtungsindexen.....	36
Abbildung 10: Testchart TE223 A	38
Abbildung 11: Der Testaufbau mit Testchart.....	40
Abbildung 12: WFM-Monitor, SONY PWM-F5 mit S-Log2.....	41
Abbildung 13: Aufbau des szenischen Tests	44
Abbildung 14: S-Log2 (links) und S-Log3 (rechts) bei +4 Stops Überbelichtung	45
Abbildung 15: S-Log2 (links) und S-Log3 (rechts) bei -4 Stops Unterbelichtung	46
Abbildung 16: ALEXA Plus bei +6 Stops (oben) und -4 Stops (unten)	47
Abbildung 17: ALEXA, ASA160 (links) und ASA800 (rechts) bei -5 Stops	48
Abbildung 18: ALEXA (links) und EPIC-W ohne HDRx (rechts) bei +7 Stops	49
Abbildung 19: AELXA, ASA800 (oben) und EPIC-W,(kein HDRx) bei -5 Stops (unten)	50
Abbildung 20: EPIC-W ohne HDRx (links) und mit HDRx-Faktor 2 (rechts)	51
Abbildung 21: EPIC-W mit HDRx Faktor 2 (links) und 6 (rechts) bei +7 Stops.....	51
Abbildung 22: EPIC-W mit HDRx-Faktor 2, ISO 6400, +10 Stops Überbelichtung.....	52
Abbildung 23: „Simple Blend“ (links) und „Magic Motion“ (rechts) bei HDRx (Faktor 6) und +7 Stops.....	52
Abbildung 24: „Magic Motion“ bei HDRx2, Übertragung an DaVinci via ProRes4444 (oben) und TIFF (unten).....	53
Abbildung 25: Gemessener und angegebener Dynamikumfang der Kameras	53
Abbildung 26: Szenischer Test der SONY PWM F5 mit S-Log2 (oben) und S-Log3 (unten).....	55
Abbildung 27: WFM der SONY PWM-F5 mit S-Log2 (links) und ARRI ALEXA (rechts), vergrößert auf die Highlights	55
Abbildung 28: Szenischer Test der RED EPIC-W mit HDRx-Faktor 2 (links) und 6 (rechts).....	56
Abbildung 29: Bewegungsunschärfe der SONY PWM-F5 und ARRI ALEXA XT Plus	56
Abbildung 30: Bewegungsunschärfe: Alexa (links) und EPIC-W, HDRx-Faktor 6 (rechts)	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mathematische Definition, OETF Rec.709	20
Tabelle 2: Verteilung Grauskala, TE223 A.....	39
Tabelle 3: Belichtungsreihe, Charttest, 1. Durchgang.....	42

1 Einleitung

1.1 Thema der Arbeit

„The cool thing is the difference is immediately obvious. It's not like 2K and 4K, where you have to sit in the first (...) five rows of the movie theater, to actually see the difference (...) independent of the resolution, the viewing distance. You can see a very quick difference. (...) which is why I think High Dynamic Range is gonna be a very very important thing, people are wanna be pushing for.“¹

Wie Shipman-Müller in seiner Präsentation zum Thema „High Dynamic Range“ erklärt, ist nicht allein die größtmögliche Auflösung ausschlaggebend für ein qualitativ hochwertiges Bild. Ebenso spielen andere Parameter wie der Dynamikumfang oder der Farbraum eine große Rolle. Eine erhöhte Auflösung verbessert den Bildeindruck nur in Abhängigkeit des Betrachtungsabstandes und der Bild diagonale. Andererseits ist beispielsweise der Dynamikumfang und der Farbraum eines Bildes unabhängig dieser Kriterien.

Dennoch stand lange Zeit die immer größer werdende Auflösung von Videomaterial und Wiedergabegerät im Vordergrund der Hersteller. Auflösungen wie 4K oder 8K, welche eine bis zu sechsfache Auflösung im Vergleich zu Full-HD bieten, galten als das zu erreichende Ziel für Kamera und Display.

Durch die etwa 2015 neu entwickelten Technologien namens „Backlit LCD“, „OLED“, oder auch „QuantumDot“, sowie den neuen Laserprojektoren der Kinos, ist es möglich, immer größere Dynamikumfänge und Farbräume darzustellen. Lange Zeit war das bekannte TV-Bild durch den veralteten Rec.709 Standard auf etwa 5 Blendenstufen Dynamikumfang² begrenzt. Dieser kann zwar minimal gesteigert werden, jedoch sind durch die neuen Technologien nun, auch auf dem Consumer-Markt, Dynamikumfänge von bis zu 15 Blendenstufen möglich.³

Besonders die Streaming-Plattformen wie Amazon, Netflix oder Sky erkennen diese neuen Möglichkeiten, sich von den TV-Sendern abzuheben. Amazon ist somit die erste Streaming-Plattform die Inhalte anbietet, um die neuen Dynamikumfänge beliefern zu können. Ein Beispiel hierfür ist die Amazon Original Serie „Mozart in the Jungle“.⁴ Der bildgestaltende Kameramann (DoP) Tobias Datum, stellte in seinen Vorbereitungen zur

¹ Shipman-Müller, Marc (2016): Video, veröff. bei Arri.com am 22.12.2016, URL: <http://www.arri.com/de/videos/videos/hdr-overview-arri-workshop-in-paris-december-2016/> (Zugriff am: 04.01.2018), Hier 18:30 – 18:55Min.

² Vgl. Brown, Blain (2015): The filmmaker's guide to digital imaging. For cinematographers, digital imaging technicians, and camera assistants, Burlington, MA, S.

³ Vgl. ebd.

⁴ Vgl. ebd.

Serie Folgendes für sich fest: "The emphasis was on having 4K resolution, but I found the resolution isn't as key to the look of the image as color and dynamic range."⁵

Aus diesen Aussagen ergibt sich für den Verfasser die Annahme, dass ein verbesserter Dynamikumfang ein deutlich größerer Faktor für die Qualität eines Bildes ist, als die simple Steigerung der Auflösung. Daraus erschließt sich die Frage, wie solch ein Dynamikumfang bereits bei der Herstellung von Inhalten erreicht werden kann. Somit widmet sich das Thema dieser Arbeit dem Dynamikumfang digitaler Filmkameras.

1.2 Ziel, Aufbau und Methodik der Arbeit

Zum grundlegenden Verständnis wird zunächst der Aufbau einer 35mm Kamera beschrieben. Danach wird der Aufbau einer digitalen Filmkamera in den Bereichen Sensor, Farbdetektierung und Signalverarbeitung erläutert. Daraufhin folgt die technische Definition des Dynamikumfangs mit besonderem Bezug auf die Videografie. Ergänzend hierfür wird das menschliche Sehempfinden in Verbindung mit dem Dynamikumfang gesetzt. Nachfolgend werden die Bedeutungen von Linear, Log und Gamma genauer untersucht. Hierfür werden die Begriffe Gamma- und Log-Kurve, sowie der Rec.709 Standard erläutert. Im Kapitel der logarithmischen Kurven werden diese nicht nur allgemein, sondern auch in Bezug auf spezielle Hersteller veranschaulicht. In Folge darauf werden ebenfalls die speziellen HDR-Technologien der Hersteller ARRI und RED untersucht. Vorhergehend wird zusätzlich der Begriff HDR hinsichtlich dessen Entstehung in der Fotografie und Umsetzung in der Videografie beleuchtet.

Als wissenschaftliche Eigenleistung dieser Arbeit wird ein Vergleich der Kameras ARRI ALEXA XT Plus, RED EPIC-W und SONY PWM-F5 durchgeführt. In Vorbereitung auf diesen werden zunächst die einzelnen Kameramodelle vorgestellt. Daraufhin wird der verwendete Testaufbau, sowie die notwendigen Gerätschaften erläutert. Der Kameravergleich wird in zwei unterschiedliche Vorgehensweisen geteilt. Diese werden voneinander getrennt behandelt und ausgewertet. Hierfür werden neben Standbildern der Aufnahmen, überwiegend Screenshots des Waveform-Monitors der Software DaVinci Resolve 14 verwendet.

Abschließend setzt sich der Verfasser mit den Ergebnissen der vorhergegangenen Theorie, sowie der wissenschaftlichen Eigenleistung in einer Schlussbetrachtung kritisch auseinander und zieht ein abschließendes Fazit.

⁵Kaufman, Debra (2017): HIGHER GROUND. A Producer's Guide To High Dynamic Range (HDR), Produced by, 9. Juni 2017, <http://www.producersguild.org/blogpost/1618066/278208/HIGHER-GROUND--A-Producer-s-Guide-To-High-Dynamic-Range-HDR> (Zugriff am 05.01.2018)

2 Die Filmkamera

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Filmkamera genauer erläutert. Hierfür wird für in die 35mm und die digitale Filmkamera unterschieden. Die 35mm Kamera wird behandelt, da diese erst gegen 2008⁶ von der digitalen Filmkamera abgelöst wurde und weiterhin als Maßstab für die digitale Kinematografie gilt.

2.1 Die 35mm Filmkamera

Der grundsätzliche Aufbau einer 35mm Filmkamera ist leicht verständlich. Die Kamera besteht aus einem sogenannten Magazin und einem Kamerakörper. Innerhalb des Magazins, einer lichtdichten Kassette, befinden sich zwei Rollen. Auf der sogenannten Vorratsrolle befindet sich der unbelichtete Film. Dieser wird durch einen im Kamerakörper befindlichen Antrieb abgewickelt, durch den Kamerakörper transportiert, belichtet und zuletzt wieder auf der zweiten Rolle innerhalb des Magazins aufgewickelt. Das Magazin kann für den Wechsel des Filmmaterials vom Kamerakörper getrennt werden.⁷

Für eine korrekte Belichtung und somit einem sauberen, technisch einwandfreien Bild, muss der oben genannte Filmtransport so exakt und präzise wie möglich durchgeführt werden. Daher verfügen Filmkameras über ein sehr komplexes Inneres mit vielen fein arbeitenden Mechanismen.⁸

Damit das Filmmaterial korrekt belichtet wird, muss dieses exakt vor das Bildfenster geführt werden. Sogenannte Doppel- bzw. Sperrgreifer, sowie Andruckplatten bringen den Film daher in die für die Belichtung benötigte Position. Diese Mechanismen sind mit einer rotierenden Umlaufblende verbunden, welche das Bildfenster für den Filmtransport abdeckt und erneut für den Belichtungsvorgang öffnet. Die Umlaufblende wird in zwei Sektoren unterteilt. Der Dunkelsektor schließt das Bildfenster, der Hellsektor öffnet dieses. Für gewöhnlich sind die Sektoren von gleicher Größe. Somit nimmt jeder Sektor 180° der Umlaufblende ein. Durch diese Anordnung der Sektoren ergibt sich eine festgelegte Belichtungszeit, welche mit der Bildwechselfrequenz variiert. Wird also mit der filmüblichen Frequenz von 24 FPS gearbeitet, ergibt sich durch die 180° des Hellsektors der Umlaufblende, eine Belichtungszeit von $\frac{1}{48}$ Sekunde. Bei 25 FPS ergibt sich eine Belichtungszeit von $\frac{1}{50}$ Sekunde. Die Anpassung des Hellsektors und somit der Belichtungszeiten ist nötig, um mit 24 FPS in europäischen und amerikanischen Ländern mit

⁶ Vgl. Shipman-Müller (2016): 2:38-2:55Min.

⁷ Vgl. Schmidt, Ulrich (2013): Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Berlin, Heidelberg, S.430f.

⁸ Vgl. ebd.

50, bzw. 60 Hz Netzfrequenz arbeiten zu können. Lichtquellen wie beispielsweise Halogenmetallampfen beginnen durch diese Netzfrequenzen zu pulsieren. Für Menschen sind diese Helligkeitsschwankungen nicht erkennbar. Bei Filmmaterial mit 24 FPS und 180° Belichtungszeit führen diese jedoch zu störenden Interferenzen, dem sogenannten Flicker-Effekt. Um diesen vorzubeugen kann entweder die Bildwechselfrequenz geändert, oder die Belichtungszeit an die Periodendauer der Netzfrequenz angepasst werden. Die Periodendauer bei 50Hz beträgt 20ms. Folglich muss der Hellsektor so verkleinert werden, dass die Belichtungszeit $\frac{1}{50}$ s (20ms) beträgt. Der prozentuale Anteil des Hellsektors an der gesamten Umlaufblende ergibt sich durch die Multiplikation der Bildwechselfrequenz und der Belichtungszeit. 20ms multipliziert mit 24 FPS ergeben 48% von 360° der gesamten Umlaufblende. Somit ergibt sich eine Größe des Hellsektors von 172,8° für eine flickerfreie Aufnahme mit 24fps und 50Hz Netzfrequenz. In Ländern mit einer Netzfrequenz von 60Hz ergibt sich mit dieser Rechnung ein Hellsektor von 144°. Ein weiterer Grund für die Verkürzung der Belichtungszeit, bzw. des Hellsektors, kann die Verringerung der Bewegungsunschärfe von schnellen Objekten sein.⁹

Durch einen Sucher kann das Bild kontrolliert werden. Hierfür wurde von ARRI das sogenannte Spiegelreflexsystem entwickelt. Dieses besteht aus einem auf dem Dunkelsektor angebrachten Spiegel. Dieser lenkt das durch das Objektiv fallende Licht während des Filmtransportes in ein Suchersystem. Durch dieses Spiegelreflexsystem kann das abgelenkte Licht zusätzlich auch zu einer Videokamera gelenkt werden. Diese wird dann zur Videoausspielung am Set verwendet. So können alle Beteiligten am Set das aktuelle Bild mitverfolgen.¹⁰

2.2 Die digitale Filmkamera

Bei digitalen Kameras muss zwischen einer Video- und Fernsehkamera und einer „digital Cinematography Camera“¹¹, also einer digitalen Filmkamera für die Kinematografie, unterschieden werden.

Digitale Kameras verwenden anstatt beispielsweise einem 35mm Film, elektronische Bildwandler, sogenannte Sensoren, zur Erfassung von Licht.¹² Die Linse der Kamera bündelt das einfallende Licht auf den Sensor. Dort wird das gebündelte Licht in eine Spannung gewandelt. Die entstandene Spannung wird nun von einem Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler) ausgelesen. Dabei wird die analoge Spannung des Sensors in ein digitales Signal gewandelt. In einem Prozessor kann dieses Signal dann verändert

⁹ Vgl. Schmidt (2013): S.431ff.

¹⁰ Vgl. Schmidt (2013): S.432f.

¹¹ Vgl. Schmidt (2013): S.404

¹² Vgl. ebd.

und beeinflusst werden. Hierfür wendet der Prozessor verschiedene Rechnungen und Algorithmen an. Dies kann zum Beispiel die Einstellung des Weißabgleiches sein. Nach der Verarbeitung durch den Prozessor wird dann auf unterschiedliche Wege gespeichert und über die Videoausgänge ausgegeben.¹³ Im folgenden Kapitel werden diese Schritte genauer erläutert.

2.2.1 Sensorenarten

Der Sensor ist das Herzstück einer digitalen Kamera. Hier wird das einzufangende Bild erfasst und in elektrische Spannungen gewandelt. Die Qualität des Bildwandlers ist maßgeblich für die spätere Qualität des Signals. So wird bereits bei dem verwendeten Sensor über Auflösung oder Farbtreue entschieden.¹⁴ Grundsätzlich gilt es zwei verschiedene Wandlerarten zu unterscheiden. Einerseits gibt es CCD¹⁵-, andererseits CMOS¹⁶-Bildwandler.

Bei CCD-Bildwandlern fällt Licht auf die sogenannten Pixel. Diese bestehen aus lichtempfindlichen Halbleiterelementen. Durch den inneren Photoeffekt erzeugen die einfallenden Photonen innerhalb der Halbleiter freie Ladungsträger. Diese werden in einem MOS-Kondensator gespeichert, welcher sich in einem lichtdichten Bereich des Pixels befindet. Ein mit diesem Speicherkondensator verbundenen Transistor regelt, wann der Kondensator Ladungsträger speichern soll und wann diese ausgegeben werden.¹⁷ Befinden sich mehrere dieser Pixel in einer Reihe, bezeichnet man dies als CCD-Zeile. Solche CCD-Zeilen können zur Abtastung eines vorbeifahrenden Films verwendet werden. Dieser wird durchleuchtet und von der CCD-Zeile erfasst. In digitalen Kameras ist dieses Prinzip jedoch nicht möglich. Hier wird für die Erfassung eines zweidimensionalen Bildes ein ebenso zweidimensionaler Bildwandler benötigt. Dies geschieht durch mehrere solcher Zeilen und wird als CCD-Fläche bezeichnet.¹⁸ Diese kann als analoges Schieberegister angesehen werden. Für den Auslesevorgang werden, durch Steuerungsspannungen, die Ladungen innerhalb der Kondensatoren der Pixel einer Zeile zum nächsten Kondensator des benachbarten Pixels transportiert. Über ein am Ende dieser Zeilen befindliches Ausleseregister werden diese Ladungen dann ausgelesen.¹⁹ Da der Auslesevorgang zeilenweise stattfindet, sind diese horizontal voneinander getrennt.²⁰

¹³ Vgl. Brown (2015): S.2ff

¹⁴ Vgl. Erhardt, Angelika (2008): Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen, Systeme und Anwendungen, Wiesbaden, S.28

¹⁵ Charge-Coupled Device

¹⁶ Complementary Metal Oxid Semiconductor

¹⁷ Vgl. Erhardt (2008): S.28

¹⁸ Vgl. Schmidt (2013): S.360

¹⁹ Vgl. Webers, Johannes (2011): Die Technik der audiovisuellen Medien. Film - Audio - Video, Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg, S.536f

²⁰ Vgl. Schmidt (2013): S.360

Verschiedene CCD-Wandler-Architekturen beschreiben unterschiedliche Verfahren dieses Auslesevorganges. Neben weiteren, auf dem Markt vorhandenen Architekturen sind die IT²¹-, FT²²- und FFT²³- Architekturen am weitesten verbreitet. Die verschiedenen Vorteile der einzelnen Verfahren unterscheiden sich größtenteils in Größe, Geschwindigkeit und Füllfaktor. Der Füllfaktor gibt an wie groß die aktive Sensorfläche, der lichtempfindliche Teil des Sensors, gegenüber der gesamten Sensorfläche ist.²⁴ So ist bei bestimmten Sensorarchitekturen von CCD-Sensoren ein Füllfaktor von bis zu 100 Prozent möglich. CDD-Sensoren haben jedoch einige Nachteile. Wenn ein Pixel des Sensors deutlich überbelichtet wird können, aufgrund der Konstruktion des Sensors, einige Ladungen auf benachbarte Pixel übertragen werden. Ebenfalls können durch den Transport der Ladungsträger von einem Pixel durch den anderen, bei Überbelichtung einzelner Pixel, falsche Ladungswerte entstehen. Resultat sind in diesem Fall großflächige Überbelichtungen, welche sich zusätzlich zeilenweise ausbreiten. Dieser Effekt wird Blooming und Smear genannt. Durch eine zusätzliche Anti-Blooming-Schaltung auf dem Sensor kann dieses Problem unterbunden werden. Die Lichtempfindlichkeit des Sensors fällt damit jedoch um etwa 30 Prozent. Zusätzlich ist die Geschwindigkeit von CCD-Sensoren durch das Ausleseregister deutlich begrenzt.²⁵

Obwohl CMOS-Bildwandler schon vor den CCD-Bildwandlern erfunden wurden, waren diese lange Zeit, aufgrund ihres geringen Füllfaktors, den CCD-Wandlern unterlegen. Der geringe Füllfaktor ergibt sich aus dem Aufbau eines einzelnen CMOS-Pixels. Dieser besteht ebenfalls aus einem lichtempfindlichen Halbleiter und einem oder mehreren MOS-Transistoren. Diese Transistoren ermöglichen eine direkte Verarbeitung innerhalb des Pixels. So kann, je nach Ausleseverfahren, beispielsweise eine direkte Adressierung einzelner Pixel, die Verstärkung des Signals, eine Rauschreduktion, oder auch AD-Wandlung innerhalb des Pixels realisiert werden.²⁶ Die Pixel sind in einer Sensormatrix mit M Zeilen und N Spalten angeordnet. Ein Adressdecoder mit M Ausgängen wählt für den Ausleseprozess eine Zeile aus. Die Pixel dieser Zeile schalten dadurch ihre Ladungen zum Auslesen auf eine Leseleitung. Diese Leseleitungen sind entlang der Spalten der Matrix angeordnet. Am Ende der Matrix befindet sich pro Spalte ein Signalprozessor. Hier können einfache Filterungen, Verstärkungen, oder auch eine AD-Wandlung durchgeführt werden. Die Signalprozessoren werden dann über einen Multiplexer ausgelesen. Wenn eine zusätzliche Adressierung der Spalten notwendig ist, kann ein zweiter Adress-

²¹ Interline-Transfer

²² Frame-Transfer

²³ Full-Frame-Transfer

²⁴ Vgl. Erhardt (2008): S.29ff

²⁵ Vgl. Erhardt (2008): S.38

²⁶ Vgl. Schmidt (2013): S.368ff

decoder verbaut werden. Somit ist einer der größten Vorteile des CMOS-Sensors gegenüber eines CCD-Sensors das separate Auslesen jedes einzelnen Pixels.²⁷ Es werden keine Ladungen von Pixel zu Pixel transportiert, sondern direkt von einer eigenen Verarbeitungsschaltung ausgelesen und gewandelt. Durch diese Adressierung der einzelnen Pixel und Zeilen ist ein einfacher Wechsel zwischen einer Auslesung im interlaced²⁸ und progressiven²⁹ Modus möglich. Zusätzlich kann auch ein Teilbereich des Sensors gesondert ausgelesen werden. Des Weiteren ermöglicht die direkte Verarbeitung des Signals innerhalb des Chips eine schnellere Bildwechselfrequenz und ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis.³⁰

Auch für CMOS-Sensoren gibt es verschiedene Sensorarchitekturen. Diese unterscheiden sich überwiegend in der Anzahl der verbauten Transistoren und deren Verschaltung innerhalb eines Pixels. Wie auch bei den CCD-Bildwandlern haben sich neben einigen unterschiedlichen Architekturen bestimmte durchgesetzt. Diese sind passive Pixel Sensoren (PPS), aktive Pixel Sensoren (APS) und aktive Pixel Sensoren mit Photogate (Photogate APS) und Pixel mit logarithmischer Kennlinie.³¹

Neben den bereits genannten Vorteilen des wahlfreien Zugriffs und der Möglichkeit die gesamte Verarbeitung bereits innerhalb des Sensors zu realisieren, weist der CMOS-Sensor noch weitere Vorteile gegenüber den CCD-Sensoren auf. Diese sind ein deutlich geringerer Stromverbrauch (CCD zwischen 2-5W; CMOS zwischen 20-50mW), weniger Kosten beim Herstellungsprozess, sowie kein Blooming-Effekt.³²

Der CMOS-Sensor weist jedoch nicht nur Vorteile, sondern auch Nachteile auf. Diese können durch Neuerungen der Architektur oder weiteren Signalverarbeitungen minimiert werden. Durch die Vielzahl der verbauten Transistoren innerhalb eines Pixels verringert sich die aktive Sensorfläche. Eine Lösung hierfür ist die Verwendung der On-Chip-Lens-Technologie (OCL)³³, bei der vor jedem Pixel eine kleine Linse angebracht ist, welche das einfallende Licht auf die aktive Sensorfläche bündelt.³⁴ Eine weitere Möglichkeit den Füllfaktor zu erhöhen sind „back-illuminated CMOS“.³⁵ Diese Technologie wurde von SONY entwickelt und verwendet eine geänderte Anordnung der Schichten eines Pixels. Somit können mehr Photonen den lichtempfindlichen Teil des Pixels treffen.³⁶ Bei der großen Anzahl an Transistoren kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle exakt arbeiten. So wird von jedem Pixel die vorhandene Ladung anders behandelt. Dies führt

²⁷ Vgl. Erhardt (2008): S.39ff

²⁸ Zeilensprungverfahren

²⁹ Vollbildverfahren

³⁰ Vgl. Schmidt (2013): S.369

³¹ Vgl. Erhardt (2008): S.39ff

³² Vgl. Erhardt (2008): S.46

³³ Vgl. Schmidt (2013): S.370

³⁴ Vgl. Schmidt (2013): S.364f

³⁵ Vgl. Brown (2015): S.9

³⁶ Vgl. ebd.

zu einem sichtbaren Rauschen, dem sogenannten Fixed Pattern Noise (FPN). Dieses Rauschen war ebenfalls ein Grund, dass CMOS-Sensoren qualitativ nicht mit CCD-Sensoren mithalten konnten. Durch neue Filterungsprozesse auf dem Sensor kann dieses FPN jedoch minimiert werden. Des Weiteren führt das zeilenweise Auslesen des CMOS-Sensors zu einem zeitlichen Versatz zwischen diesen Zeilen. Während eine dieser Zeilen ausgelesen wird, nimmt eine benachbarte noch Ladungen auf und wird somit zu einem anderen Zeitpunkt ausgelesen. Das Problem welches dabei entsteht, nennt sich Rolling-Shutter-Effekt. Dieser hat zur Folge, dass beispielsweise gerade, vertikale Linien bei schnellen Bewegungen verzerrt dargestellt werden. CCD-Sensoren besitzen aufgrund ihrer Bauart und des Ausleseverfahrens mit Zwischenspeicherung in den Kondensatoren einen Global-Shutter. Dieser Global-Shutter ist bei CMOS-Sensoren ebenfalls möglich, erhöht jedoch die Komplexität der Architektur und den Signalverarbeitungsaufwand. Die meisten Hersteller von CMOS-Sensoren minimieren dieses Problem durch ein möglichst schnelles Auslesen.³⁷

Die Bildwandlergrößen sind vermutlich der größte Unterschied zwischen Video- bzw. Fernsehkameras und digitalen Filmkameras. So verwenden Erstere überwiegend Sensoren mit einer Größe von $\frac{2}{3}$ Zoll. Digitale Filmkameras nutzen stattdessen größere Sensoren. Diese entsprechen meistens der Größe von 35mm Film.³⁸ Einige wenige Kameramodelle verwenden sogar Sensoren die der Größe von 65 oder 70mm Film entsprechen, wie beispielsweise die ARRI ALEXA 65³⁹. Diese Größenunterschiede haben unter anderem großen Einfluss auf die Tiefenschärfe der erzeugten Bilder.⁴⁰ Diese Tiefenschärfe (engl. depth-of-field) wird in Filmen künstlerisch genutzt, um die Aufmerksamkeit des Betrachters auf bestimmte Bereiche des Bildes zu lenken. Die Tiefenschärfe beschreibt wie groß der Bereich vor der Kamera ist, welcher Scharf abgebildet wird.⁴¹ Video- und Fernsehkameras erzeugen mit ihren kleineren $\frac{2}{3}$ Zoll Sensoren eine höhere Tiefenschärfe und erleichtern dadurch die Produktion.⁴² Die großen Sensoren der digitalen Filmkameras haben eine geringe Tiefenschärfe und erzeugen unter anderem daher den durch 35mm Film bekannten und gewohnten „Kinolook“.⁴³

Die Größe der Sensoren determiniert nicht zwangsläufig die Auflösung des Sensors. Jedoch resultieren kleine Sensoren mit vielen Pixeln zu einer deutlich kleineren Fläche pro Pixel. Dies bedeutet, dass jeder Pixel weniger Licht empfangen kann und somit mehr

³⁷ Vgl. Schmidt (2013): S.370f

³⁸ Vgl. Schmidt (2013): S.404

³⁹ Vgl. ARRI Rental Group (Hrsg.): 65mm Reborn. Technische Daten, o.A., URL: http://arrirentalgroup.com/alexa65/index_de.html (Zugriff am: 05.02.2018)

⁴⁰ Vgl. Schmidt (2013): S.404

⁴¹ Vgl. Brown (2015): S.18

⁴² Vgl. Schmidt (2013): S.404

⁴³ Vgl. Brown (2015): S.18

verstärkt werden muss. Diese Verstärkung verursacht mehr Rauschen und mindert damit die Qualität des Signals. Größere Pixel haben daher weniger Rauschen und einen höheren Dynamikumfang. Ebenfalls hat die Größe des Sensors Einfluss auf die effektive Brennweite der verwendeten Optiken. Diese effektive Brennweite kann mittels des Crop-Faktors eines Sensors berechnet werden.⁴⁴

2.2.2 Farbdetektierung

Digitale Filmkameras arbeiten, anders als Video- und Fernsehkameras, mit nur einem Sensor. Letztere verwenden oftmals drei getrennte Sensoren zur Farbdetektierung.⁴⁵ Hierbei ist jeder Sensor für eine Primärfarbe zuständig. Das Licht, welches aus dem Objektiv in das Innere der Kamera fällt, tritt zunächst in einen Prismenblock ein und wird innerhalb dessen in verschiedene Richtungen in die Farben Rot, Grün und Blau gelenkt.⁴⁶ In Abbildung 1 ist der Strahlengang innerhalb des Prismenblocks dargestellt.

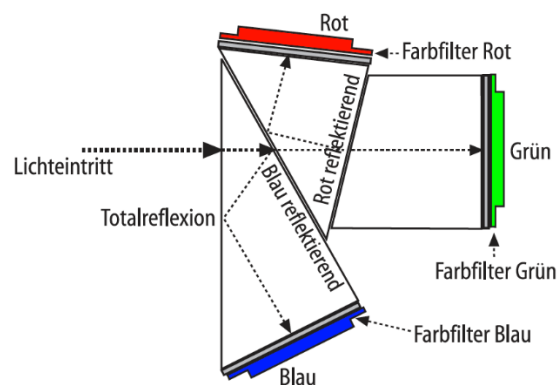


Abbildung 1: Prismenblock zur Farbtrennung für drei Sensoren (vom Verfasser bearbeitet)
Quelle: Schmidt, Ulrich (2013): *Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotchnik in SD, HD, DI, 3D*, Berlin, Heidelberg, S. 378

Bei einer Bauweise mit nur einem Sensor wird für die Farberkennung ein sogenannter Bayer-Farbfilter verwendet. Dieser Filter ist nach dem Prinzip eines Mosaiks aufgebaut. Das Mosaik besteht aus verschiedenen Farbfiltern für Rot, Grün und Blau und ist direkt vor dem Sensor angebracht. So wird dafür gesorgt, dass jeder Pixel des Sensors eine zugewiesene Farberkennung hat.⁴⁷

⁴⁴ Vgl. ebd.

⁴⁵ Vgl. Schmidt (2013): S.404

⁴⁶ Vgl. Erhardt (2008): S.50f

⁴⁷ Vgl. Erhardt (2008): S.48

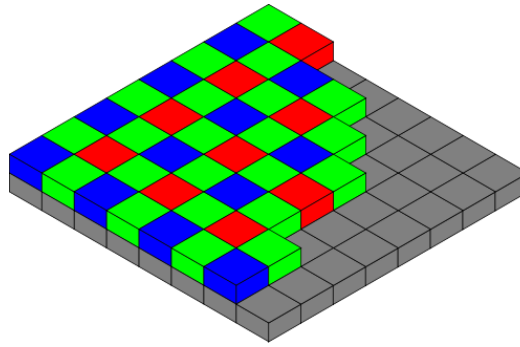


Abbildung 2: Der Bayer-Farbfiler

Quelle: Odelama (Hrsg.): *Developing a RAW photo file 'by hand'*, 01.04.2015, URL: <http://www.odelama.com/photo/Developing-a-RAW-Photo-by-hand/> (Zugriff am: 07.02.2018)

Trotz einiger Nachteile bei der Verwendung von nur einem Sensor und der Farberkennung durch einen Bayer-Farbfiler, wird diese Bauart besonders bei digitalen Filmkameras verwendet. Der Grund hierfür ist, dass durch eine Lösung mit drei Sensoren inklusive eines Prismenblocks, der Abstand der Sensoren zum Objektiv vergrößert wird. Da die im Filmbereich bereits verwendeten Objektive auch an digitalen Kameras zum Einsatz kommen sollen, wird hier auf nur einen Sensor gesetzt, welcher sich im gleichen Abstand wie ursprünglich das Filmmaterial befindet. Des Weiteren kann mit den Nachteilen des Bayer-Farbfilters auf verschiedene Arten umgegangen werden. Beispielsweise lässt sich die verringerte Farbauflösung durch eine höhere Sensorauflösung ausgleichen.⁴⁸

2.2.3 Signalverarbeitung

Die vom Sensor ausgegebenen Signale werden von der Kameraelektronik verarbeitet und beeinflusst. Diese Verarbeitung kann Bildparameter wie Weißabgleich, eine Gamma-Kurve oder die Codierung für ein Ausgabesignal beinhalten. So kann gegebenenfalls nach der Vorverstärkung der Ladung eines Pixels in der weiteren Signalverarbeitung eine solche Ladung zusätzlich elektrisch verstärkt werden. Diese zusätzliche Verstärkung, das sogenannte Gain, findet meist in festen Stufen statt und wird in Dezibel (dB) gemessen⁴⁹. Eine Verstärkung von 6dB stellt eine Verdopplung des Wertes dar. Weil das Vergrößern der Blende einer Linse um einen Blendenwert (Stop) ebenfalls eine Verdopplung des einfallenden Lichts bedeutet, wird das Gain oftmals auch in Stops angegeben. Analog dazu bewirkt also eine Verringerung der Verstärkung um 6dB, beziehungsweise um einen Stop, die Halbierung des Wertes.⁵⁰ Durch diese elektronische

⁴⁸ Vgl. Schmidt (2013): S.380f.

⁴⁹ Vgl. Schmidt (2013): S.406

⁵⁰ Vgl. Brown (2015): S.20

Verstärkung sinkt ebenfalls der Signal-Rausch-Abstand, weil das Rauschen eines Sensors ebenfalls um den gleichen Wert verstärkt wird.⁵¹

Bei einer Verstärkung von 0dB wird von der nativen ISO des Sensors gesprochen. Die ISO beschreibt die Lichtempfindlichkeit eines Sensors. Eine native ISO ist die Empfindlichkeit bei der das Signal des Sensors nicht verstärkt werden muss und wird durch den verbauten Sensor vorgegeben. Durch die Änderung der ISO kann die Empfindlichkeit des Sensors elektronisch geändert werden, indem zum Beispiel eine Verstärkung zugeschaltet wird. Eine Verdopplung des ISO-Wertes bedeutet in diesem Fall eine Verstärkung um einen Stop⁵². Die Angabe der Empfindlichkeit des Sensors wird neben ISO auch ASA oder Exposure Index (EI) genannt.⁵³

Des Weiteren wird von der Kameraelektronik auch der Auslesevorgang des Sensors gesteuert. Falls nicht bereits schon auf dem Sensor geschehen, wird durch die Kameraelektronik auch eine Digitalisierung (AD-Wandlung) vorgenommen.⁵⁴ Diese erfolgt ortsunabhängig nach dem Abtast-Theorem, welches besagt, dass ein analoges Signal mit mindestens der doppelten Frequenz abgetastet werden muss, als die höchste im analogen Signal vorkommende Frequenz. Wird dieses Theorem nicht eingehalten, können falsche Frequenzen erkannt und digitalisiert werden. Dies führt zu dem sogenannten Alias-Effekt.⁵⁵ Blain Brown schreibt jedoch in seiner Monografie „The Filmmaker’s Guide to digital imaging“: „But because sampling theory refers to the frequency of the video image, which is made up of a line pair, you need as many samples as lines, not twice as many samples as lines.“⁵⁶

Durch eine Schwarzwertkorrektur und einer Glättung des Signals kann ebenfalls durch die Kameraelektronik eine Rauschreduzierung vorgenommen werden. Ein wichtiger und notwendiger Verarbeitungsschritt bei der Verwendung eines Bayer-Farbfilters zur Farberkennung ist das debayering.⁵⁷ Durch den mosaikähnlichen Aufbau des Bayer-Farbfilters (Abbildung 2), bei dem jeder Pixel lediglich Rot, Grün oder Blau darstellt, ist vorerst keine exakte Darstellung eines Videos möglich. Debayering bedeutet, dass vier benachbarte Pixel, bestehend aus zwei grünen und jeweils einem roten und einem blauen Pixel, zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Durch diese Gruppierung können dann die fehlenden zwei Farbwerte jedes Pixels interpoliert werden. Dieser Vorgang ist sehr komplex und fasst oftmals mehr als vier Pixel in einer Gruppe zusammen. Außerdem unterscheiden sich diese debayering-Prozesse zwischen den Herstellern stark.

⁵¹ Vgl. Schmidt (2013): S.406

⁵² Vgl. Brown (2015): S.20f

⁵³ Vgl. Brown (2015): S.99

⁵⁴ Vgl. Webers (2011): S.775

⁵⁵ Vgl. Brown (2015): S.6f

⁵⁶ Brown (2015): S.7

⁵⁷ Vgl. Webers (2011): S.775

Zudem werden diese immer wieder weiterentwickelt und verbessert, um die Qualität der Kameras zu steigern.⁵⁸

In hochprofessionellen Bereichen, bei dem Datenmengen keine Rollen spielen, werden diese Veränderungen des Videosignals jedoch nicht in das zu speichernde Signal „eingebacken“, sondern getrennt voneinander gespeichert. Dieser Vorgang wird RAW⁵⁹-Aufzeichnung genannt. Dabei werden die unveränderten Daten des Sensors direkt abgespeichert. Die oben genannten Prozesse können dennoch an der Kamera eingestellt werden. Diese wirken sich dann jedoch nur auf die direkte Ausgabe des Videosignals für Monitore am Set aus. Die verwendeten Einstellungen werden als Metadaten zusätzlich zur Videodatei abgespeichert. Grund für die Aufzeichnung von RAW-Daten ist die Möglichkeit zur nachträglichen Anpassung dieser Parameter in der Postproduktion. Sind diese bereits in dem Video „eingebacken“, lassen sie sich nicht, beziehungsweise nur unter Qualitätsverlust, nachträglich verändern. Nachteil dieser RAW-Daten ist, dass sie durch die fehlende Kompression in der Kamera sehr große Datenmengen aufweisen.⁶⁰

⁵⁸ Vgl. Brown (2015): S.12f

⁵⁹ Engl. für Roh

⁶⁰ Vgl. Brown (2015): S.4f

3 Dynamikumfang

Für den Dynamikumfang gibt es verschiedene Bezeichnungen, wie Brightness Range, Luminance Range, Kontrastumfang, oder die direkte englische Übersetzung: Dynamic Range.⁶¹ Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden die Bezeichnungen Dynamikumfang und Kontrastumfang verwendet. Im Folgenden Kapitel werden diese genauer erklärt und definiert. Außerdem wird der Begriff Dynamikumfang in Verbindung mit dem menschlichen Sehen und der Videografie erläutert.

3.1 Definition Dynamikumfang

Der Dynamikumfang (DR) beschreibt im Allgemeinen einen großen Teil der Signalverarbeitung und ist daher eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale für diese. Die technische Definition ist das logarithmische Verhältnis zwischen dem höchsten lesbaren Signalwert (SW) und dem Rauschen (RMS-Noise):⁶²

$$DR = 20 \times \log \left(\frac{SW}{RMS - Noise} \right)^{63}$$

Der Dynamikumfang der Videografie beschreibt das Verhältnis zwischen den hellsten und dunkelsten Bereichen eines Bildes.⁶⁴ Genauer bedeutet dies, dass mit dem Dynamikumfang die Anzahl der Variationen von Helligkeiten einer Szene beschrieben wird, welche von einem System aufgenommen und wiedergegeben werden können. So gibt dieser an, wie exakt ein System eine Vielzahl von Variationen verarbeiten kann.⁶⁵ Gemessen beziehungsweise angegeben, wird der Dynamikumfang als Kontrastumfang oder Stops. Der Kontrastumfang gibt ein Verhältnis zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Helligkeitswert an. Absolutes Schwarz wird hierbei nicht als Helligkeitswert angesehen. So gibt beispielsweise ein Kontrastumfang von 500:1 an, dass der höchste Helligkeitswert 500-mal dem niedrigsten Helligkeitswert entspricht.⁶⁶



Abbildung 3: Graukeil mit einem Dynamikumfang von 13:1

Quelle: Image Engineering (Hrsg.): TE223 A. data sheet, o.A., URL: https://www.image-engineering.de/content/products/charts/te223/downloads/TE223_A_data_sheet.pdf (Zugriff am: 16.01.2018)

⁶¹ Vgl. Brown (2015): S.68

⁶² Vgl. Bloch, Christian (2012): The HDR1 handbook 2.0. High dynamic range imaging for photographers and CG artists, Santa Barbara, CA, S.19

⁶³ Vgl. Schmidt (2013): S.374

⁶⁴ Vgl. Shipman-Müller (2016), 4:40-4:57Min.

⁶⁵ Vgl. Brown (2015): S.68

⁶⁶ Vgl. Bloch (2012): S.16ff

Die Angabe in Stops, oder auch Exposure Value (EV), kommt aus der Fotografie. Diese gibt ursprünglich an, wie viel Licht die Bildebene einer Kamera trifft, kann jedoch auch zur Angabe des Dynamikumfangs verwendet werden. Anders als der Kontrastumfang werden Stops durch eine Potenzfunktion beschrieben. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung um einen Stop (EV), eine Verdopplung des Kontrastumfangs (CR) bewirkt.⁶⁷ Eine Umrechnung ist in beide Richtungen möglich:

$$CR = 2^{EV} \quad ; \quad EV = \log_2(CR)$$

3.2 Das menschliche Sehen

Das menschliche Sehen beruht darauf, dass Licht durch die Iris in das Innere des Auges fällt. Dort trifft das Licht auf die Netzhaut und wird in Nervenreize umgesetzt.⁶⁸ Diese werden dann im Gehirn verarbeitet. Dieses gesamte System wird im englischen Human Visual System genannt und mit HVS abgekürzt.⁶⁹ Die Netzhaut besteht aus sogenannten Stäbchen und Zapfen, welche das einfallende Licht wahrnehmen und in Nervenreize umsetzen. Für das Tagsehen und die Wahrnehmung von Farbe sind die Zapfen verantwortlich. Die hochempfindlichen Stäbchen können bereits minimale Helligkeiten wahrnehmen und werden daher für das Nachtsehen verwendet. Da diese jedoch keine Farbe detektieren können und die Zapfen bei geringen Helligkeiten nicht verwendet werden können, nimmt die Farbwahrnehmung mit fallender Helligkeit ab.⁷⁰

Die Angaben für den Dynamikumfang des menschlichen Sehens unterscheiden sich teilweise enorm. So wird in dem Sammelband „High-Dynamic-Range (HDR) Vision“ von B. Hoefflinger (Hrsg.) ein Dynamikumfang von 200.000:1⁷¹ genannt, welcher etwa 18 Stops entspricht. In „the filmmakers guide to digital imaging“ von Blain Brown wird ein Dynamikumfang von circa 20 Stops⁷² angegeben. Dies entspricht einem Verhältnis von etwa 1.000.000:1. Trotz der Unstimmigkeiten sind diese Werte enorm und geben den gesamten Umfang an. Solche hohen Kontrastverhältnisse des menschlichen Auges werden jedoch nur durch Adaption des Helligkeitsempfindens an die Umgebung möglich. Diese Adaption wird über die Größe der Iris, sowie der Verwendung und Mischung des Tag- und Nachtsehens verwirklicht. So wird der Dynamikumfang ohne Adaption der Augen mit circa 6,5 Stops (90:1) angegeben.⁷³ Zusätzlich wird eine lokale Adaption der Stäbchen und Zapfen vorgenommen. Dies bedeutet, dass unterschiedliche Empfindlichkeiten

⁶⁷ Vgl. Bloch (2012): S.16ff

⁶⁸ Vgl. Schmidt (2013): S.21

⁶⁹ Vgl. Banterle, Francesc u.a. (2011): Advanced high dynamic range imaging. Theory and practice, Boca Raton, FL, S.7

⁷⁰ Vgl. Schmidt (2013): S.26

⁷¹ Vgl. Hoefflinger, Bernd (Hrsg.) (2007): High-Dynamic-Range (HDR) Vision, Berlin Heidelberg, S.13

⁷² Vgl. Brown (2015): S.68

⁷³ Vgl. Brown (2015): S. 68

für verschiedene Bereiche des menschlichen Sehfeldes verwendet werden.⁷⁴ Des Weiteren werden Helligkeitsveränderungen des HVS nicht linear verarbeitet, sondern gleichen eher einer logarithmischen Verarbeitung.⁷⁵ Dies bedeutet, dass sich die Wahrnehmung dieser Helligkeitsveränderungen ändert, je heller diese werden.⁷⁶

3.3 Dynamikumfang in der Videografie

Der Dynamikumfang einer digitalen Kamera ist vor allem vom Sensor und der Verarbeitungseinheit abhängig. So ist dieser in den hellen Bildbereichen von der maximalen Ladungsmenge eines Pixels und in den dunklen Bildbereichen vom Rauschen begrenzt. Digitale Fernseh- und Videokameras haben beispielsweise einen Kontrastumfang von etwa 500:1, was etwa 9 Stops an Dynamikumfang entspricht. Digitale Filmkameras bieten einen Dynamikumfang von mindestens 12 Stops. Dieser Wert bezieht sich auf den analogen Film, welcher immer wieder als Maß für die Qualität einer digitalen Filmkamera verwendet wird. Dieses Minimum von 12 Stops wird für einen ausreichenden Spielraum für die spätere Postproduktion benötigt.⁷⁷

Lange Zeit war der Dynamikumfang von digitalen Filmkameras stark begrenzt. Durch die Weiterentwicklungen in diesem Bereich weisen moderne Kameras deutlich höhere Umfänge auf. Dennoch sind diese weiterhin, wie bereits erwähnt, begrenzt. Der Szenenkontrast einer aufzunehmenden Szene überschreitet oftmals einen Wert von 1.000.000:1. Dieser enorme Dynamikumfang kann nicht mit 12 Stops (4000:1) aufgezeichnet werden. Daher kann es passieren, dass selbst hellgraue Bereiche innerhalb dieser Szene als vollständig weiß angenommen werden. Alle helleren Bereiche erscheinen dann ebenfalls als weiß. Dieses Problem tritt auf, wenn bereits bei Hellgrau die maximale Ladungsmenge eines Pixels erreicht ist. So können für hellere Bildbereiche nicht noch mehr Ladungen aufgenommen werden, da der Pixel bereits komplett „gefüllt“ ist. Ist diese maximale Ladungsmenge eines Pixels erreicht, wird dies von Sensorherstellern „Full Well Capacity“ genannt, gängiger ist jedoch die Bezeichnung clipping. Das Gegenteil stellen die dunklen Bildbereiche dar. Hier reicht ab einer bestimmten Helligkeit der dunklen Bildbereiche das einfallende Licht nicht aus, um Ladungen innerhalb des Pixels zu lösen. Alle Bildbereiche unterhalb dieser Helligkeit werden als schwarz aufgezeichnet.⁷⁸

⁷⁴ Vgl. Bloch (2012): S.22

⁷⁵ Vgl. Schmidt (2013): S.26

⁷⁶ Vgl. Brown (2015): S.76

⁷⁷ Vgl. Schmidt (2013): S.374

⁷⁸ Vgl. Brown (2015): S.69f

Wie bereits erwähnt, wird der Dynamikumfang im unteren Bereich vom Rauschen begrenzt. Jedes Bildwandlersystem weist Rauschen auf, welches unterschiedliche Ursachen haben kann.⁷⁹ Rauschen sind unregelmäßige Störungen im Bild, welche dieses körnig erscheinen lassen.⁸⁰ Durch dieses kann eine genaue Abgrenzung des Kontrastumfangs erschwert werden, da der niedrigste Helligkeitswert, abgesehen vom absoluten Schwarz durch das Rauschen verfälscht wird. Maßgeblich für diesen niedrigsten Helligkeitswert sind zu erkennende Details, welche nicht Rauschen sind.⁸¹

Besonders stark wirkt sich Rauschen in den dunkleren Bildbereichen aus. Das aus der geringen Ladung der Pixel resultierende „schwache“ Signal ist von dem des Rauschens schwieriger zu unterscheiden. Des Weiteren werden dunkle Bildbereiche oftmals zusätzlich verstärkt, wodurch ebenfalls ein eventuell noch schwaches Rauschen verstärkt wird.⁸²

Daher ist ein möglichst großer Signal-Rausch-Abstand ebenfalls ein großes Qualitätsmerkmal von Kameras bezüglich des Dynamikumfangs. Der Signal-Rausch-Abstand, auch Signal to Noise Ratio (SNR) genannt, gibt den Abstand des maximalen Signalpegels zum Rauschen an und wird in Dezibel angegeben.⁸³

⁷⁹ Vgl. Bloch (2012): S.16

⁸⁰ Vgl. Schmidt (2013): S.374

⁸¹ Vgl. Brown (2015): S.19

⁸² Vgl. ebd.

⁸³ Vgl. Schmidt (2013): S.373

4 Linear, Log und Gamma

4.1 Linear

Wie bereits erwähnt, arbeitet das menschliche Sehempfinden nach einer logarithmischen Umsetzung von tatsächlicher Helligkeit zu empfundener Helligkeit. Anders als das HVS arbeiten Bildwandler jedoch grundsätzlich linear. Dies bedeutet, dass das einfallende Licht auf den Sensor in einem direkten Verhältnis zur aufgenommenen Helligkeit steht. Fällt doppelt so viel Licht auf den Sensor, werden doppelt so viele Ladungen innerhalb des Pixels gelöst. Diese doppelte Menge an Ladungen, beziehungsweise die daraus resultierende Spannung, wird in ein digitales Signal gewandelt. Dieses Signal beinhaltet dann die doppelte Helligkeitsinformation. Kurz gefasst bedeutet dies, dass doppelt so viel Licht gleich doppelte Helligkeit des finalen Bildes bedeutet.⁸⁴ Durch Blain Browns Aussage: „(...) the ultimate goal is accurate representation of the scene as it actually appears in the real world; artistic interpretations aside, of course.“⁸⁵ kann angenommen werden, dass eine lineare Wiedergabe einer Szene der idealen Wiedergabe ohne künstlerische Eingriffe entspricht. Laut Brown ist in der Kinematografie eine exakte Aufnahme und Wiedergabe der Realität erwünscht.⁸⁶

Jedoch ist die Linearität der digitalen Bildwandler in der Realität alles andere als ein Ideal. Ein Problem dieser linearen Aufzeichnung von Szenen ist, dass die Szenenkontraste in der Realität oftmals enorm groß sein können. So kann beispielsweise eine Außenszene mit hellem Sonnenlicht und dunklen Schatten schnell einen Kontrastumfang von 1.000.000:1 (20 Stops) überschreiten. Solch ein Dynamikumfang ist selbst mit den modernsten digitalen Filmkameras nicht möglich aufzuzeichnen. Diese erreichen oftmals einen maximalen Dynamikumfang von 12 bis 15 Stops. Deshalb werden bei einer solchen Szene und der Verwendung einer Kamera mit beispielsweise 15 Stops an Dynamikumfang, Details in den dunkeln sowie hellen Bildbereichen nicht erfasst und somit nicht aufgezeichnet.⁸⁷

Eine lineare Aufzeichnung der Helligkeitsunterschiede einer Szene wird als „scene-referred“ bezeichnet. „Scene-referred“ bedeutet, dass die tatsächliche Szene als Referenz gilt. Es wird damit also die exakte photometrische Eigenschaft der Szene wiedergegeben und ist nicht dem menschlichen Sehempfinden angepasst.⁸⁸

⁸⁴ Vgl. Brown (2015): S.71

⁸⁵ Brown (2015): S.71

⁸⁶ Vgl. ebd.

⁸⁷ Vgl. Brown (2015): S.70f

⁸⁸ Vgl. Hoefflinger (2007): S.180

4.2 Gamma-Kurven

4.2.1 Entwicklung der Gamma-Kurven

Gamma-Kurven sind seit den ersten, als Monitor eingesetzten, Kathodenstrahlröhren (CRT) ein fester Bestandteil des Videosignals. Eine CRT gibt aufgrund ihres Aufbaus ein Videosignal nicht linear wieder und verzerrt die Helligkeitswerte. Um dennoch eine lineare Wiedergabe auf CRT-Monitoren zu bewirken, werden sogenannte Gamma-Kurven verwendet, welche das Signal bereits bei der Aufnahme vorentzerren. Dies bedeutet, dass durch eine Vorentzerrung das Videosignal einer Kamera so verändert wird, dass es auf einem Display linear wiedergegeben wird. Somit gilt, anders als bei „scene referred“ nicht die Szene, sondern der Monitor als Referenz.⁸⁹

Eine Gamma-Kurve ist eine Übertragungsfunktion, beziehungsweise eine „Opto-Electrical Transfer Funktion“ (OETF) in Form einer Exponentialfunktion.⁹⁰ Diese beeinflusst den Zusammenhang des einfallenden Lichts und dem daraus resultierenden Codewert des Signals. Dabei bleibt die eigentliche Spannung des Pixels gleich. Es wird lediglich beeinflusst wie diese Spannung als Helligkeitswert interpretiert wird.⁹¹ Der Exponent der Funktion wird Gamma (γ) genannt. Ein Gamma-Wert von $\gamma=1$ beschreibt eine lineare Funktion. Ist dieser Wert kleiner, beziehungsweise größer als 1, so ergibt sich für Ersteres eine nach unten und für Letzteres eine nach oben gebeugte Kurve.⁹²

Eine CRT hat ein physikalisch festgelegtes Gamma von circa 2,2. Damit ein Videosignal auf einem Röhrenmonitor korrekt angezeigt wird, wird das Signal bereits bei der Aufzeichnung, genauer bei der AD-Wandlung, korrigiert. Dies geschieht dadurch, dass eine Gamma-Vorentzerrung angewandt wird, welche den Kehrwert der Gamma-Kurve des CRT-Monitors beschreibt. Diese Gamma-Vorentzerrung mit $\gamma=0.45$ gleicht das $\gamma=2,2$ des Monitors aus und bewirkt damit wieder eine lineare Wiedergabe des Videosignals (Abbildung 4). Ein nicht korrigiertes Videosignal wird auf einem CRT-Monitor nicht linear angezeigt und erscheint damit für den Menschen unnatürlich.⁹³

Moderne Displays wie LCD, Plasma, OLED, etc. weisen keine physikalisch festgelegte Gamma-Kurve auf und sind in der Lage Videosignale linear darzustellen. Aufgrund der großen Menge an bisher existierenden, bereits korrigierten Videomaterial und der weiterhin bestehenden Rückwärtskompatibilität zum CRT-Monitor, müssen diese dennoch

⁸⁹ Vgl. Brown (2015): S.72ff

⁹⁰ Vgl. Shipman-Müller (2016): 35:35-36:41Min.

⁹¹ Vgl. Schmidt (2013): S.408

⁹² Vgl. Brown (2015): S.72f

⁹³ Vgl. ebd.

eine Gamma-Kurve von circa 2,2 verwenden. Dieses Gamma wird dabei in Form einer „Lookup Table“ (LUT) digital imitiert.⁹⁴

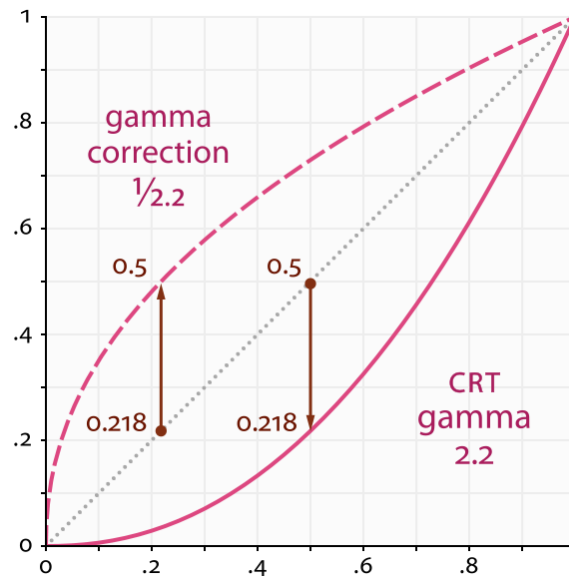


Abbildung 4: Gamma-Voreinstellung und CRT-Gamma

Quelle: Root6 (Hrsg.): *What's the best setting for Gamma with Rec.709 video?*, 19.11.2014, URL: <http://www.root6.com/support-2/tips/whats-the-best-setting-for-gamma-with-rec-709-video/> (Zugriff am: 07.02.2018)

In der modernen Anwendung von Gamma-Kurven ist der Gamma-Wert nicht festgelegt. In den meisten Kameras kann dieser variabel verändert werden. Ein Wert von $\gamma=0,45$ ist jedoch in der Regel als Voreinstellung gegeben. Durch die Veränderung des Wertes nach oben beziehungsweise nach unten, kann das Bild einerseits kontrastreicher, oder kontrastärmer gestaltet werden. Neben dieser Erhöhung oder Absenkung des Gamma-Wertes, kann ebenfalls die sogenannte Knie-Funktion, sowie der Schwarzwert eingestellt werden.⁹⁵

Die Knie-Funktion besteht aus zwei, voneinander getrennt einstellbaren Parametern: dem Knie-Punkt sowie dem Abflachungswert. Durch diese Funktion können Details in den hellen Bildbereichen vor clipping geschützt werden, indem in diesen Bildbereichen der Kontrast verringert wird. Dies ist möglich, da ab dem Knie-Punkt die Gamma-Kurve abgeflacht wird. Der Einstellungsbereich für diesen Punkt liegt meistens zwischen 80 und 110 Prozent des Videosignals.⁹⁶ Der Abflachungswert gibt an, wie stark die Kurve ab dem Knie-Punkt beeinflusst werden soll. Durch einen langsameren Anstieg können Details vor clipping geschützt werden.⁹⁷

⁹⁴ Vgl. Brown (2015): S.72f

⁹⁵ Vgl. Brown (2015): S.77

⁹⁶ Vgl. Schmidt (2013): S.411

⁹⁷ Vgl. Brown (2015): S.78

4.2.2 Recommendation ITU-R BT.709

Die Recommendation ITU-R BT.709 ist ein, von der International Telecommunication Union (ITU) entworfener Standard für HD-Videosignale. Dieser umfasst mehrere Spezifikationen wie Auflösung, Bildwechselfrequenzen und unter anderem auch eine OETF als Gamma-Kurve.⁹⁸ Abgekürzt wird dieser Standard mit Rec.709 und kann aufgrund der verwendeten Gamma-Vorentzerrung als „display referred“⁹⁹ bezeichnet werden. Der Rec.709 Standard wurde 1990 entwickelt und bezieht sich auf CRT-Monitore. Da diese neben der Helligkeitsverzerrung ebenfalls einen deutlich beschränkten Dynamikumfang aufweisen, limitiert Rec.709 diesen ebenfalls technisch auf etwa 5 Stops. Dieser begrenzte Dynamikumfang kann jedoch durch eine Knie-Funktion, beziehungsweise durch Veränderung des Schwarzwertes, ausgedehnt werden.¹⁰⁰ Die ITU unterteilt die Gamma-Kurve des Rec.709 Standards in zwei Abschnitte und beschreibt diese wie folgt:

Funktion:	Abschnitt:
$V = 4,500 L$	$0,018 \geq L \geq 0$
$V = 1,099 L^{0,45} - 0,099$	$1 \geq L \geq 0,018$

(L=Luminanz des Videosignals; V=Resultierendes elektronisches Signal)

Tabelle 1: Mathematische Definition, OETF Rec.709

Quelle: Vgl. International Telecommunication Union (Hrsg.): Recommendation ITU R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange, 17.06.2015, URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709-6-201506-l/en> (Zugriff am: 05.02.2018)

Tabelle 1 zeigt, dass die Übertragungsfunktion bei einem Helligkeitswert von unter 0,018 eine lineare Funktion aufweist. Ab dem Schwellenwert von 0,018 beschreibt diese eine Exponentialfunktion nach der aktuellen Gamma-Vorentzerrung von $\gamma=0,45$. Diese anfängliche Linearität beruht darauf, dass eine Exponentialfunktion mit einem Gamma-Wert niedriger als 1 eine nahezu vertikale Funktion gegen 0 beschreibt. Dies würde eine extreme Verstärkung der dunklen Bildbereiche verursachen. Um das Rauschen dieser zu minimieren wird daher eine lineare Funktion verwendet.¹⁰¹

⁹⁸ Vgl. International Telecommunication Union (Hrsg.): Recommendation ITU R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange, 17.06.2015, URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709-6-201506-l/en> (Zugriff am: 05.02.2018)

⁹⁹ Vgl. Brown (2015): S.71

¹⁰⁰ Vgl. Brown (2015): S.74f

¹⁰¹ Vgl. Poynton, Charles (1998): The Rehabilitation of Gamma, in: B.E., and T.N. Pappas (Hrsg.) (1998): Human Vision and Electronic Imaging III, Proceedings of SPIE/IS&T Conference 3299, Bellingham, Wash. S.239

Rec. 709 beinhaltet neben der OETF für Kameras, ebenfalls eine Electro-Optical Transfer Function (EOTF) für die Umsetzung von elektronischen Bildsignalen in Licht. Diese EOTF ist bei Displays ein tatsächlicher Standard. Jedoch ist die OETF bei Kameras nicht zwangsläufig als Standard zu verstehen. Im Zusammenhang mit Kameras gilt die OETF von Rec.709 eher als eine Empfehlung anstatt eines Standards.¹⁰² Jeder Hersteller nimmt eigene, kleinere oder größere Veränderungen an dieser Übertragungsfunktion vor. Daher kann nicht garantiert werden, dass zwei Kameras mit einer Rec.709 Einstellung auch tatsächlich das gleiche Bild produzieren. Unterschiedliche Hersteller bedeuten immer auch eine unterschiedliche OETF und damit auch einen unterschiedlichen Dynamikumfang.¹⁰³

4.2.3 Weiterentwicklungen von Rec.709

Durch die Veränderung des Gamma- oder Schwarzwertes, sowie der Anwendung der Knie-Funktion, kann der Dynamikumfang bereits minimal gesteigert werden. Jedoch ist dieser weiterhin limitiert. Außerdem kann durch die falsche Anwendung dieser Parameter schnell ein unnatürliches Bild entstehen. Daher haben Kamerahersteller eigene Gamma-Kurven entwickelt, um den Dynamikumfang der Kameras zu steigern. Diese unterscheiden sich zwischen den Herstellern stark und werden, ebenfalls Herstellerabhängig, Hypergamma, Cinegamma, Film Rec, oder Low Contrast Curve genannt. Die Steigerung des Dynamikumfangs wird meistens in Prozentwerten im Verhältnis zu Rec.709 angegeben. Diese Werte sind beispielsweise 200%, 300%, usw.. Hierbei sagt ein Wert von 200% aus, dass clipping erst bei 200% im Verhältnis zu Rec.709 (clipping bei 100%) entsteht. Daher wird, je höher diese Angabe ausfällt, ein höherer Dynamikumfang erreicht. Dies bedeutet, dass eine flachere Kurve verwendet wird, welche zu weniger Kontrasten im gesamten Bild führt und das Bild flach wirken lässt. Deshalb ist eine Farbbearbeitung in der Postproduktion notwendig.¹⁰⁴

4.3 Logarithmische Kurven

Ein Problem der Linearität digitaler Sensoren beruht auf dem logarithmischen Helligkeitsempfinden des menschlichen Sehens. Dieses Problem nennt sich „The Code 100 Problem“ und bezieht sich auf den minimalen Helligkeitsunterschied den der Mensch wahrnehmen kann und die Umsetzung dieser in Codewerte. So wurde festgestellt, dass

¹⁰² Vgl. Brown (2015): S.7

¹⁰³ Vgl. Shippides, Andy (2013): HDTV Standards, HDVideoPro, 1. Oktober 2013, URL: <https://www.hdvideopro.com/columns/help-desk/hdtv-standards/2/> (Zugriff am: 05.02.2018)/

¹⁰⁴ Vgl. Brown (2015): S.78f

der sogenannte „Just Noticeable Difference“ (JND), also der kleinste wahrnehmbare Helligkeitsunterschied des Menschen, bei circa einem Prozent liegt. Setzt man nun diesen JND beispielsweise mit einem 8Bit linearen Videosignal ins Verhältnis, wird deutlich, dass durch die Linearität viele Codewerte in den hellen Bildbereichen „verschwendet“ werden und in den dunklen Bildbereichen nicht ausreichen. Ein 8Bit Videosignal kann insgesamt 256 Helligkeitswerte zwischen Schwarz und Weiß darstellen. Hierfür nimmt Schwarz den minimalen Codewert von 0 und Weiß den maximalen Codewert von 255 an. Der prozentuale Abstand dieser Helligkeitswerte ist in den dunklen Bildbereichen deutlich größer, als in den hellen. Zum Beispiel ist der Sprung von Codewert 20 auf 21 ein prozentualer Unterschied von 5 Prozent, von Codewert 200 auf 201 jedoch nur noch 0,5 Prozent. Dies bedeutet, da der Unterschied in den dunklen Bereichen über einem Prozent liegt, dass deutliche Helligkeitsabstufungen sichtbar werden. Dieser Effekt wird banding oder contouring genannt. In den hellen Bildbereichen ist der Unterschied deutlich geringer als der JND des Menschen. Somit können dort Helligkeitsunterschiede aufgenommen werden, die vom Menschen überhaupt nicht wahrgenommen werden können. Aufgrund der Nichtlinearität aller menschlichen Sinne, kann das „Code 100 Problem“ nicht nur auf das menschliche Sehen, sondern auf alle Sinne des Menschen angewandt werden.¹⁰⁵ Zur Vermeidung des bandings sind Helligkeitsschritte von maximal einem Prozent auch in den dunkelsten Bildbereichen nötig. Dies bedeutet, dass der Sprung vom Codewert 1 zum nächst höheren Codewert nicht den Wert 1, sondern 0,01 betragen muss. So ergibt sich ein nächst höherer Codewert von 1,01 – ein Prozent Anstieg vom vorherigen Codewert. Diese kleinen Schritte werden dann, aufgrund der Linearität, bis zum höchsten Codewert weitergeführt. So werden circa 9900 dieser Helligkeitsschritte, beziehungsweise 14Bit benötigt, um einen Dynamikumfang von 100:1 darzustellen. Diese Lösung führt jedoch zu einer noch größeren „Verschwendung“ von Codewerten in den hellen Bildbereichen.¹⁰⁶

¹⁰⁵ Vgl. Brown (2015): S.76f

¹⁰⁶ Vgl. Poynton (1998): in Human Vision and Electronic Imaging III, Proceedings of SPIE/IS&T Conference 3299 (Hrsg.) (1998) S. 238

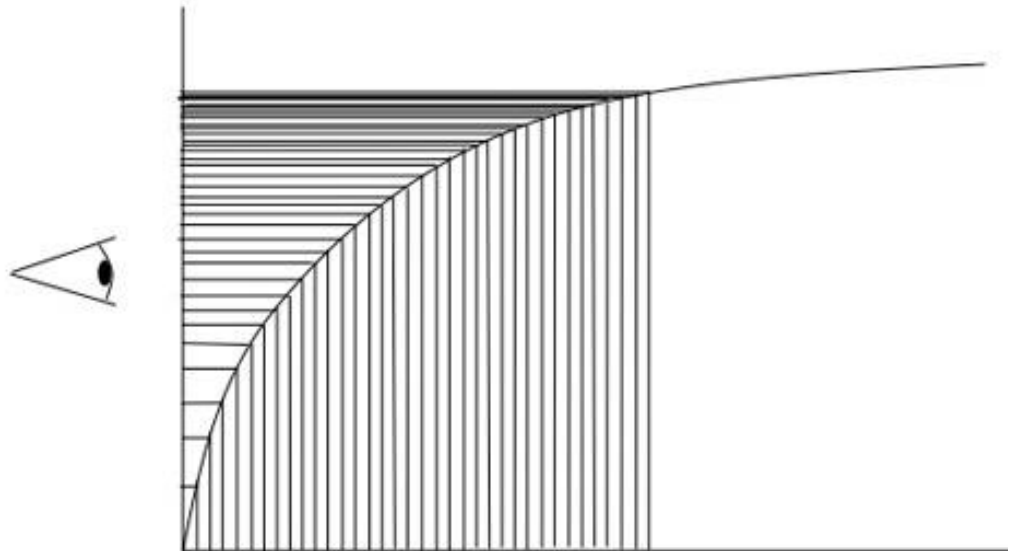


Abbildung 5: Lineares Abtasten

Quelle: Adams, Art (2009): *The Not-So-Technical Guide to S-Log and Log Gamma Curves*, PRO VIDEO COALITION, 03. Februar 2009, URL: https://www.provideocoalition.com/the_not_so_technical_guide_to_s_log_and_log_gamma_curves/ (Zugriff am: 06.02.2018)

In Abbildung 5 wird deutlich, dass die Bits in den hellen Bildbereichen „verschwendet“ werden, da Unterschiede zu gering werden um durch das HVS wahrgenommen zu werden.

Diesem Problem kann, neben der simplen Verwendung von mehr Bits und damit der unnötigen Steigerung von Datenmengen und noch größerer „Verschwendung“ dieser in den hellen Bildbereichen, durch eine ungleichmäßige Verteilung der Bits entgegengewirkt werden. Dies kann einerseits mit Hilfe des Gamma-Wertes und der Knie-Funktion realisiert werden, oder durch eine logarithmische Verteilung der Bits.¹⁰⁷

Eine logarithmische OETF (kurz: Log-Kurve) beruht, nicht wie Gamma auf einer Exponentialfunktion, sondern auf einer logarithmischen Funktion. Diese entsteht durch die logarithmische, also ungleichmäßige Verteilung der Bits.¹⁰⁸ Damit kann, bei der gleichen Anzahl an Bits, ein größerer Dynamikumfang aufgezeichnet werden. Somit kann die Verwendung von Log-Kurven ebenfalls als verlustfreie Kompression bezeichnet werden.¹⁰⁹ Abbildung 6 zeigt, dass durch die logarithmische Abtastung keine Bits in den hellen Bereichen „verschwendet“ werden.

¹⁰⁷ Vgl. Brown (2015): S.77

¹⁰⁸ Vgl. Brown (2015): S.82

¹⁰⁹ Shaw, Steve (2013): Introduction to the Digital Intermediate Process. in: Svanberg, Lasse (Hrsg.) (2013): *The EDCF guide to digital cinema production*, Burlington, MA., o.A.

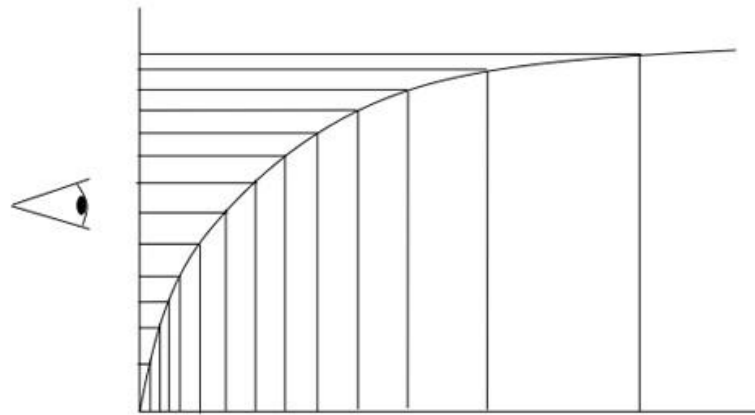


Abbildung 6: Logarithmisches Sampling
Quelle: Adams, Art (2009): in PRO VIDEO COALITION, 03. Februar 2009

Eine Log-Kurve ist nicht „display referred“. Dies ist einerseits der große Vorteil, jedoch gleichzeitig auch ein Nachteil von Log-Kurven. Da diese die Helligkeiten einer Szene stark komprimieren, um diese mit den vorhandenen Bits verlustfrei speichern zu können, wirkt es auf einem Monitor kontrastarm und blass. Dadurch ist eine Farbbearbeitung in der Postproduktion unumgänglich. Aus demselben Grund wird oftmals während der Aufzeichnung das Bild zum Betrachten mittels eines LUTs in Rec.709 konvertiert. Dies geschieht jedoch unabhängig von der Aufzeichnung und wirkt sich nur auf den Monitor aus.¹¹⁰

Ähnlich wie bei den Gamma-Kurven haben auch hier verschiedene Hersteller eine oder mehrere Log-Kurven entwickelt.¹¹¹ Dabei folgen diese nicht zwangsläufig einer exakten Log-Funktion. Die Abstände zwischen den Bits werden von den Herstellern vergrößert oder verkleinert, je nachdem welches Ziel erreicht werden soll. Dennoch ist das grundlegende Ziel aller Log-Funktionen, unabhängig des Herstellers: Nur die Unterschiede aufzeichnen, welche von dem menschlichen Auge erfasst werden können und alles andere zu ignorieren.¹¹² Bei manchen Herstellern ist es möglich, die genaue Funktion einzusehen, andere wiederum veröffentlichen diese nicht.¹¹³

Im Folgenden wird auf die, für den späteren Vergleich relevanten, Log-Kurven der Hersteller SONY, ARRI und RED eingegangen.

¹¹⁰ Vgl. Brown (2015): S.84f

¹¹¹ Vgl. Brown (2015): S.86

¹¹² Vgl. Adams, Art (2009): The Not-So-Technical Guide to S-Log and Log Gamma Curves, PRO VIDEO COALITION, 03. Februar 2009, URL: https://www.provideocoalition.com/the_not_so_technical_guide_to_s_log_and_log_gamma_curves/ (Zugriff am: 06.02.2018)

¹¹³ Vgl. Brown (2015): S.86

4.3.1 SONY S-Log

SONY bietet insgesamt drei verschiedene Versionen ihrer sogenannten S-Log Kurven an. Da jedoch die für den Test verwendete SONY PWM-F5 nur S-Log2 und S-Log3 als Einstellungsmöglichkeiten bietet, werden im Folgenden nur diese genauer betrachtet.

SONY gibt in „S-Log2 Technical Paper“ an, dass S-Log2 eine Log-Kurve ist, welche auf die SONY PWM F65 angepasst ist. Des Weiteren verwendet S-Log2 einen niedrigeren Codewert für mittleres Grau als S-Log1. So liegt 18% Grau bei Ersterem bei einem Codewert von 347 und bei S-Log1 bei 394. Der Codewert für Schwarz ist bei beiden S-Log Versionen gleich und liegt bei 30. Der Dynamikumfang von S-Log2 wird mit 1300% angegeben. (Angabe wie in Kapitel 4.2.3 Weiterentwicklungen Rec-709).¹¹⁴

Die genaue Formel der S-Log2 Funktion lautet:

$$\text{Für } x \geq 0 \text{ gilt: } y = \left(0,432699 * \log_{10} \left(\frac{x}{219} + 0,037584\right) + 0,616596\right) + 0,03 \quad 115$$

$$\text{Für } x < 0 \text{ gilt: } y = x * 3,53881278538816 + 0,030001222851889303 \quad 116$$

Die S-Log3 Kurve wird von SONY ebenfalls in einem veröffentlichten Dokument vorgestellt. S-Log3 verwendet genauso wie S-Log2, keinen Highlight-Roll-off. Dafür ist die Beugung der Kurve im unteren Teil für die dunklen Bildbereiche weniger ausgeprägt. SONY behauptet daher, dass dies mehr einer exakten Log-Funktion entspricht. Mittleres Grau wird bei S-Log3 höher angesiedelt und liegt bei einem Codewert von 420. Des Weiteren wird angegeben, dass S-Log3 eineinhalb zusätzliche Stops an Dynamikumfang bieten soll. SONY verwendet für jeden Belichtungsindex die gleiche Log-Kurve.¹¹⁷ Dies ist in Abbildung 7 deutlich erkennbar.

¹¹⁴ Vgl. SONY (Hrsg.): S-Log2 Technical Paper, o.A., URL: https://pro.sony.com/bbsccms/assets/files/micro/dmpc/training/S-Log2_Technical_PaperV1_0.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

¹¹⁵ SONY (Hrsg.): S-Log2 Technical Paper, o.A.

¹¹⁶ Ebd.

¹¹⁷ Vgl. SONY (Hrsg.): Technical Summary for S-Gamut3/S-Log3 and S-Gamut3/S-Log3, o.A., URL: https://pro.sony.com/bbsccms/assets/files/micro/dmpc/training/TechnicalSummary_for_S-Gamut3_S-Gamut3_S-Log3_V1_01.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

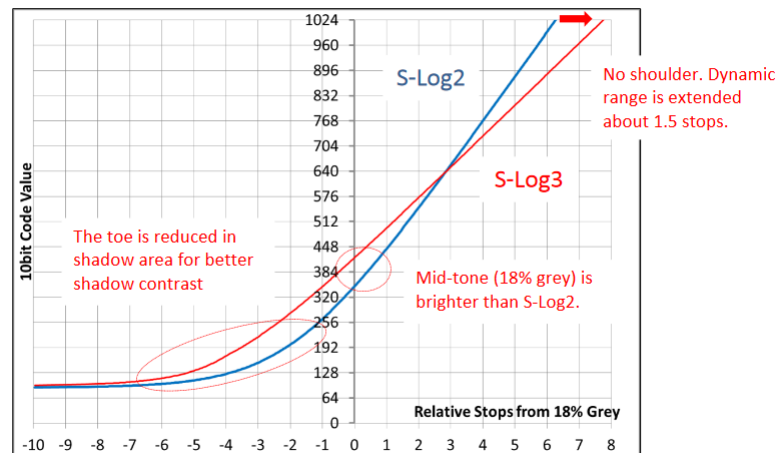


Abbildung 7: Grafische Darstellung von S-Log2 und S-Log3

Quelle: SONY (Hrsg.): *Technical Summary for S-Gamut3.Cine/S-Log3 and S-Gamut3/S-Log3*, o.A., URL: https://pro.sony.com/bbsccms/assets/files/micro/dmpc/training/TechnicalSummary_for_S-Gamut3Cine_S-Gamut3_S-Log3_V1_01.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

Formel für S-log3 lautet wie folgt:

$$\text{Für } in \geq 0,01125 \text{ gilt: } out = \frac{(420 + \log_{10} \left(\frac{in + 0,01}{0,18 + 0,01} \right) * 261,5)}{1023} \quad 118$$

$$\text{Für } in < 0,01125 \text{ gilt: } out = \frac{(in * (171,2102946929 - 59) / 0,01125 + 95)}{1023} \quad 119$$

4.3.2 ARRI LogC

Die LogC Kurve von ARRI ist, anders als bei S-Log, nicht eine einzelne Kurve. Für jeden Belichtungsindex von 160 bis 3200ASA wird eine spezielle Kurve verwendet. Bei jeder dieser Kurven ist mittleres Grau bei einem Codewert von 400 in einem 10Bit Signal angegeben.

Wie in Abbildung 8 zu sehen, variiert der maximale Codewert mit dem jeweiligen Belichtungsindex und der Log-Kurve. Dies begründet ARRI damit, dass wenn die Belichtung um einen Stop verringert wird, durch den Sensor ein Stop mehr in den hellen Bildbereichen aufgenommen werden kann.¹²⁰ ARRI schreibt: "Since the LogC output represents scene exposure values, the maximum value needs to be higher."¹²¹

¹¹⁸ SONY (Hrsg.): *Technical Summary for S-Gamut3./S-Log3 and S-Gamut3/S-Log3*, o.A.

¹¹⁹ Ebd.

¹²⁰ Vgl. ARRI (Hrsg.): *ALEXA LogC Curve in VFX*, o.A., URL: http://www.centron.sk/Storage/Document/Product/3453-2012-08-02_Alexa_LogC_Curve-Usage_in_VFX.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

¹²¹ Ebd.

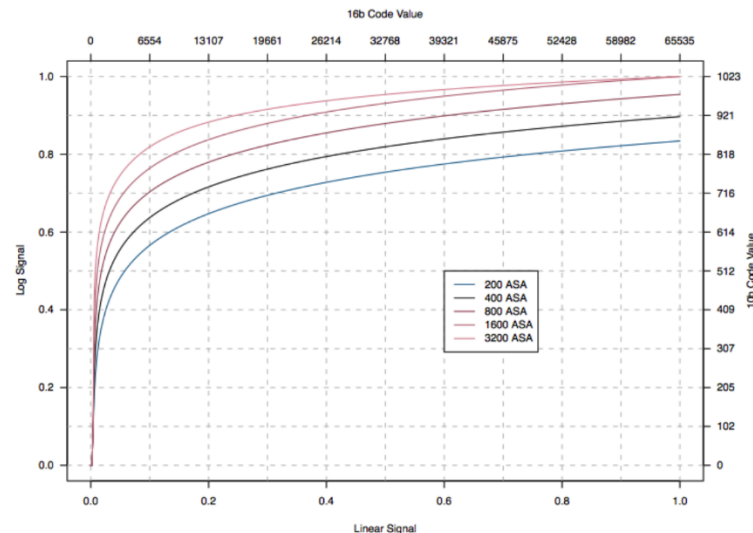


Abbildung 8: Die Log-Kurven der unterschiedlichen EI von ARRI LogC
 Quelle: ARRI (Hrsg.): ALEXA LogC Curve in VFX, o.A., URL: http://www.centron.sk/Storage/Document/Product/3453-2012-08-02_Alexa_LogC_Curve-Usage_in_VFX.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

Zusätzlich kommt bei einem Belichtungsindex von 3200ASA ein Highlight roll-off zu tragen, damit der maximale Codewert 1023 nicht überschritten wird und das Signal somit im möglichen Ausgabebereich zu halten.¹²² ARRI beschreibt die LogC Kurve mit folgender Formel:

Für $x > cut$ gilt: $y = c * \log_{10}(a * x + b) + \frac{d}{e * x} + f$ 123

Die Variablen cut und a bis f sind abhängig davon, ob Codewerte oder Signalwerte berechnet werden sollen, sowie welcher Belichtungsindex verwendet wird. Diese können aus Tabellen für jede Kombination innerhalb des Dokuments „ALEXA LogC Curve in VFX“ auf der ARRI Website entnommen werden.

4.3.3 RED Log3G10

RED bietet verschiedene Log-Kurven an. Wird jedoch die neueste „Image Processing Pipeline 2“ (IPP2) verwendet, ist der Farbraum „REDWideGamutRGB“ (RWG), sowie die Log-Kurve Log3G10 festgelegt.¹²⁴

Mittleres Grau wird bei der Log3G10 Kurve bei 33% der gesamten Skala festgelegt. Dies entspricht einem Codewert von gerundet 338 bei 10Bit. Dies ist bereits in der Benennung

¹²² Vgl. ebd.

¹²³ Ebd.

¹²⁴ Vgl. RED (Hrsg.): IPP2: IMAGE PIPELINE STAGES, o.A., URL: <https://www.red.com/downloads/58de8ef92325b41b45000543> (Zugriff am: 05.02.2018)

der Log-Kurve an der 3 zu erkennen und bedeutet, dass 18% Grau bei einem Drittel der Skala liegt. Die Bezeichnung 10 nach dem 3G besagt laut RED, dass der Dynamikumfang von mittlerem Grau bis clipping 10 Stops beträgt.¹²⁵

RED beschreibt die Formel für diese Log-Kurve wie folgt:

Für $x > 0,0$ gilt: $y = a * \log_{10}((x * b) + 1,0)$ 126

Für $x < 0,0$ gilt: $y = x * g$ 127

Mit: $x = x + c$ 128

Die Parameter a und b sind mit den Werten a=0,224282 und b=155,975327 angegeben. Zusätzlich ist ein Offset mit c=0,01 angegeben. Für den linearen Abschnitt unterhalb von x=-0,01 wird ein Gradient von g=15,1927 verwendet.¹²⁹

¹²⁵ Vgl. RED (Hrsg.): WHITE PAPER ON REDWIDEGAMUTRGB AND LOG3G10, o.A., URL: <https://www.red.com/downloads/585358faf01b3062ab0009f8> (Zugriff am: 05.02.2018)

¹²⁶ Ebd.

¹²⁷ Ebd.

¹²⁸ Ebd.

¹²⁹ Vgl. ebd.

5 High-Dynamic-Range (HDR)

HDR ist die Abkürzung für den englischen Begriff High Dynamic Range und bildet das Gegenteil zu Standard Dynamic Range (SDR). HDR bedeutet wörtlich auf Deutsch übersetzt: Hoher Dynamikumfang. Bis zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit gibt es keine genauen Definitionen, bis zu welchem Kontrastumfang Bilder mit SDR reichen und ab wann HDR-Bilder beginnen.¹³⁰ Debra Kaufman beschreibt ihn ihrem Fachartikel „HIGHER GROUND - A Producer's Guide To High Dynamic Range (HDR)“ High Dynamic Range wie folgt:

“High Dynamic Range has been captured for years by film and by an increasing fraction of digital cameras. With HDR, images can be displayed brighter and show more detail in both shadows and highlights at the same time, resulting in an image much closer to what human beings actually see.”¹³¹

Anhand dieser Aussage wird für die vorliegende Arbeit der Dynamikumfang von HDR darauf festgelegt, dass HDR dem Dynamikumfang von Filmmaterial entspricht, beziehungsweise diesen überschreitet. Gestützt wird diese Definition von Glenn Kennel (CEO ARRI), welcher innerhalb Debra Kaufmans Artikel behauptet, dass ARRI ALEXA Kameras schon immer HDR-Videos aufzeichnen. Diese weisen einen Dynamikumfang von 14,5 Stops auf, welcher laut ihm etwas größer sei als der von Filmmaterial.¹³²

Außerdem lässt sich aus Kaufmans Aussage schließen, dass HDR-Bilder einige Vorteile gegenüber SDR-Bildern aufweisen. Durch den höheren Dynamikumfang von HDR können diese ein tieferes Schwarz, sowie hellere Lichter aufzeichnen und darstellen, wodurch ein höherer Kontrast resultiert. HDR-Bilder wirken aufgrund dieses erhöhten Kontrastes schärfer. Die empfundene Schärfe eines Bildes setzt sich für den Menschen aus zwei Parametern zusammen: der Auflösung sowie dem Kontrast. Erhöht sich eines von beiden, wirkt das Bild schärfer. Des Weiteren ergeben sich bessere Farben, beziehungsweise feinere Farbabstufungen. Durch den hohen Dynamikumfang verbessert sich ebenfalls die Tiefenwirkung des Bildes. Zudem können durch den vergrößerten Spielraum in der Postproduktion, auch mehr „Looks“ kreiert werden.¹³³

Diese Unterschiede von SDR zu HDR sind auch für ein ungeschultes Auge deutlich erkennbar. Außerdem sind diese unabhängig von Betrachtungskriterien wie Bildauflösung, Bildschirmdiagonale, oder Betrachtungsabstand.¹³⁴

¹³⁰ Vgl. Shipman-Müller (2016): 0:39-1:10Min.

¹³¹ Vgl. Kaufman (2017): in Produced by, 09. Juni 2017

¹³² Vgl. ebd.

¹³³ Vgl. Shipman-Müller (2016): 17:25-18:27Min.

¹³⁴ Vgl. Shipman-Müller (2016): 18:30-18:55Min.

5.1 HDR in der Fotografie

Seit der Entwicklung der digitalen Fotografie haben Fotografen eine Methode entwickelt, um extrem große Dynamikumfange festhalten zu können. Diese wird HDR-Imaging genannt. Anstatt nur ein Bild mit fester Belichtung, werden mehrere Bilder als Belichtungsreihe erstellt. Diese werden später mit Hilfe digitaler Nachbearbeitung zusammengefügt. Somit entsteht ein Bild mit deutlich größerem Dynamikumfang als der, der mit nur einer Belichtung möglich gewesen wäre.¹³⁵

Ein Beispiel hierfür ist eine Szene bestehend aus einem Raum mit einem Fenster. Im Inneren des Raumes brennt kein Licht und draußen ist klarer Sonnenschein. Mit nur einem Bild müsste der Fotograf entscheiden, ob der Innenraum oder das Fenster korrekt belichtet werden soll. Wird die Belichtung auf den Innenraum eingestellt, wird das Fenster deutlich überbelichtet, wird also im finalen Bild als 100% Weiß dargestellt. Es sind keine Details mehr von der Umgebung und vom Himmel im Fenster zu erkennen. Für den zweiten Fall der Belichtung auf das Fenster, wird dieses korrekt wiedergegeben, jedoch wird der Innenraum deutlich dunkler bis komplett schwarz wiedergegeben. Es sind somit kaum Details des Innenraums zu erkennen. Das auf den Innenraum belichtete Bild wird im Folgenden als unterbelichtet bezeichnet. Das auf das Fenster belichtete Bild wird als überbelichtet bezeichnet. Mit Hilfe der HDR-Methode werden beide Bilder erstellt und dann zusammengefügt. Hierbei wird das überbelichtete Bild für die hellen und das unterbelichtete Bild für die dunklen Bildbereiche verwendet. Somit bleiben alle Details im Fenster, sowie dem Innenraum vorhanden. Ein Problem bei dieser Methode mit nur zwei Belichtungen stellen die mittleren Bildbereiche dar. Keines der beiden Extrema kann diese exakt wiedergeben. Die Lösung hierfür ist ein drittes Bild zu erstellen, welches eine Belichtung genau zwischen diesen beiden verwendet. Dieses kann dann für die mittleren Bildbereiche genutzt werden. Oftmals werden nicht nur drei, sondern mehrere Belichtungen verwendet. Somit erstellen manche Fotografen für noch extremere Helligkeitsunterschiede einer Szene, beispielsweise einem Sonnenuntergang (sehr heller Himmel und sehr dunkle Schatten), vier, fünf oder mehr Belichtungen.¹³⁶

¹³⁵ Vgl. Brown (2015): S.127

¹³⁶ Vgl. ebd.

5.2 HDR in der Videografie

Jedoch ist diese Methode nicht ohne Einschränkungen auf die Videografie anwendbar. Das größte Problem stellt hier der Zeitversatz zwischen den einzelnen Belichtungen dar. Sind sich bewegende Objekte in der Szene, befinden sich diese zu den verschiedenen Belichtungen an unterschiedlichen Orten. Dies resultiert darin, dass die Objekte bei Bewegungen eine Bewegungsunschärfe aufweisen. Im schlimmsten Fall befindet sich ein Objekt nur zu einer Belichtung innerhalb der Szene und erscheint somit im finalen Bild durchsichtig. Dieser Effekt wird Ghosting genannt.¹³⁷

In kontrollierbaren Situationen lassen sich durch Aufnahmetechniken wie Stop-Motion, oder Timelapse sehr gute HDR-Resultate erzielen. Jedoch bringen diese Aufnahmetechniken ebenfalls ihre eigenen Nachteile mit sich.¹³⁸

Zusätzlich gibt es neben den Stop-Motion und Timelapse Aufnahmetechniken andere Verfahren mit denen HDR-Videos erstellt werden können. So kann beispielsweise für jedes zweite Frame während der Aufnahme eine andere Belichtungszeit verwendet werden, welche später zu einem Bild kombiniert werden. Daher ergibt sich jedoch für das finale Video nur die halbe Bildwiederholungsrate. Um dies zu kompensieren könnte für die Aufnahme die doppelte FPS-Zahl verwendet werden, was letztendlich eine deutlich erhöhte Datenmenge bedeutet. Eine Alternative zu Mehrfachbelichtungen ist einerseits die Verwendung von Flüssigkristallen vor jedem Pixel des Sensors. Diese können dann zur Anpassung des einfallenden Lichts für jeden Pixel genutzt werden. Andererseits können mehrere Kameras mit unterschiedlichen Belichtungen mehrere SDR-Videos erzeugen, welche in der Nachbearbeitung zu einem HDR-Video zusammengefügt werden. Da diese aber keinen räumlichen Versatz aufweisen dürfen, werden hierfür sogenannte Strahlenteiler (ähnlich dem Prismenblock zur Farbdetektierung) oder 3D-Rigs verwendet. Durch diese ist es möglich die Sensoren der Kamera exakt in der optischen Achse zu überlagern. Einige Hersteller wie beispielsweise Omron oder Neuricam, verwenden Sensoren mit extrem hohen Dynamikumfangen. Diese sind jedoch in der Auflösung (640x480) weit von der Full-HD Auflösung (1920x1080) entfernt und weisen oftmals starke Rauschprobleme auf.¹³⁹

Neben diesen Ansätzen zur Erstellung von Videos mit sehr hohem Dynamikumfang verwenden die Hersteller ARRI und RED andere, qualitativ hochwertige Technologien.¹⁴⁰ Diese werden im Folgenden weiter erläutert.

¹³⁷ Vgl. Brown (2015): S. 127

¹³⁸ Vgl. Banterle (2011): S.17ff

¹³⁹ Vgl. ebd.

¹⁴⁰ Vgl. Bloch (2012): S.133

5.2.1 Dual Gain Technologie von ARRI

ARRI behauptet, dass ihre Technologie die beste Wahl zur Herstellung von HDR-Videos ist.¹⁴¹ Dies stützt der Hersteller nach eigenen Aussagen darauf, dass einige Produktionsfirmen für die Herstellung von HDR-Videos speziell zu ihren Kameras und deren unübertroffenem Dynamikumfang wechseln:¹⁴² „Amidst this, an increasing number of productions that already create HDR deliverables -- such as the Amazon streaming TV series (...) -- are turning to ARRI cameras, which have offered unsurpassed dynamic range since the launch of ALEXA in 2010.“¹⁴³

Mit der ersten Kamera der ALEXA-Serie im Jahr 2010 wird die sogenannte Dual Gain Technologie von ARRI verwendet. Durch diese werden ebenfalls zwei Bilder erzeugt, jedoch zur exakt gleichen Zeit und somit ohne zeitlichen Versatz und dem daraus resultierenden Ghosting.¹⁴⁴

Besonderes Augenmerk wird hierbei auf den Umgang mit den hellen Bildbereichen, den Highlights, gelegt. Auf ihrer Website behauptet ARRI, dass ein gut aussehender „roll-off“ der Highlights eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung neuer Sensoren sei. Daher wurde von ARRI in diesem Bereich viel Arbeit investiert, um diesen „roll-off“ qualitativ hochwertig und damit gut aussehend zu gestalten.¹⁴⁵

Hierfür wurde speziell für die ALEXA-Serie ein hoch komplexer CMOS-Sensor entwickelt. Diesen zeichnet, laut ARRI, zwei Besonderheiten aus. Einerseits verwendet der ALEXA-Sensor eine große aktive Sensorfläche, andererseits die bereits oben genannte Dual Gain Technologie. Durch die große aktive Sensorfläche kann ein großer Anteil des einfallenden Lichts detektiert werden und führt so zu weniger Rauschen durch notwendige Verstärkung bei weniger Licht. Die Dual Gain Technologie verwendet dazu zwei separate Ausleseleitungen pro Pixel. Diese können gleichzeitig mit unterschiedlichen Verstärkungen ausgelesen werden. Die erste Ausleseleitung wird mit dem eingestellten, hohen Gain verstärkt, die zweite mit einem niedrigeren Gain. Daher kann der zweite Datenstrom für die Bildbereiche verwendet werden, welche im ersten Datenstrom überbelichtet sind. Beide werden dann separat mit 14Bit pro Leseleitung AD-gewandelt. Durch die folgende Signalverarbeitung werden diese beiden Datenströme dann zu einem 16Bit HDR-Video kombiniert. So wird der Umgang mit den Highlights verbessert

¹⁴¹ Vgl. Shipman-Müller (2016): 25:55-26:00Min

¹⁴² Vgl. ARRI (Hrsg.): The best for HDR since 2010, o.A., URL: <http://www.arri.com/news/news/the-best-for-hdr-since-2010/> (Zugriff am: 08.01.2018)

¹⁴³ Ebd.

¹⁴⁴ Vgl. Shipman-Müller (2016): 25:25-25:54Min

¹⁴⁵ Vgl. ARRI (Hrsg.): ARRI Imaging Technologie. Best Overall Image Quality, o.A., URL: http://www.arri.com/camera/alexa/technology/arri_imaging_technology/best_overall_image_quality/ (Zugriff am: 09.01.2018)/

und ein größerer Dynamikumfang realisiert.¹⁴⁶ Diese Technologie wird ebenfalls in der ARRI Amira Kamera verwendet.¹⁴⁷

ARRI gibt ihre Kameras mit einem Dynamikumfang von 14 Stops und damit als HDR-fähig an. Dies erlaubt, laut ARRI, eine große Flexibilität und Effektivität am Set, da Fenster nicht künstlich verdunkelt werden müssen und Drehs bei Nacht mit wenig zusätzlichem Lichtequipment möglich sind.¹⁴⁸

5.2.2 HDRx von RED Digital Cinema

Mit folgender Aussage gibt RED auf ihrer Webseite an, dass ihre Kameras einen Dynamikumfang von über 13 Blendenstufen aufweisen und damit dem Dynamikumfang von 35mm Film entsprechen:¹⁴⁹ „Current RED® cameras capture over 13 stops of dynamic range in standard mode, which (...) is also comparable to color film negatives. Although this is more than enough for most applications, sometimes even more is desired.“¹⁵⁰

Obwohl dieser, laut RED, in den meisten Fällen ausreicht, kann manchmal mehr Dynamikumfang von Nöten sein. Daher wurde speziell für die Kameras RED EPIC und SCARLET die HDRx-Funktion entwickelt. HDRx baut auf dem Prinzip der Fotografie für die Erstellung von HDR-Material auf. So gibt RED an, dass in der Zeit in der normalerweise nur eine Belichtung stattfindet, zwei Belichtungen separat erzeugt werden.¹⁵¹

Im Vergleich zur Dual Gain Technologie von ARRI werden diese beiden Belichtungen zwar ebenfalls gleichzeitig erzeugt, jedoch ist der Unterschied dieser beiden Herangehensweisen zur Erzeugung von HDR-Material, dass der Belichtungsunterschied bei HDRx durch eine veränderte Belichtungszeit erzeugt wird. Daraus entsteht in gewisser Weise ein zeitlicher Versatz der Bilder.

Die erzeugten Bilder werden mit A- und X-Frames bezeichnet. Hierbei verwendet das A-Frame die fest eingestellte Belichtungszeit. Das X-Frame wird für die hellen Bildbereiche genutzt und verwendet daher eine schnellere Belichtungszeit. Diese kann mit Hilfe eines Faktors schrittweise beeinflusst werden. So bedeutet beispielsweise ein Faktor von 2, dass das X-Frame 2 Stops dunkler belichtet wird, als das A-Frame. Ist für dieses eine

¹⁴⁶ Vgl. ARRI (Hrsg.): ARRI Imaging Technologie. Alexas Sensor, o.A., URL: http://www.arri.com/camera/alexa/technology/arri_imaging_technology/alexa_sensor/ (Zugriff am: 09.01.2018)

¹⁴⁷ Vgl. Shipman-Müller (2016), 25:50-25:54Min.

¹⁴⁸ Vgl. ARRI (Hrsg.): ARRI Imaging Technologie. Best Overall Image Quality, o.A.

¹⁴⁹ Vgl. RED (Hrsg.): RED101. HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX, o.A., URL: <http://www.red.com/learn/red-101/hdrx-high-dynamic-range-video> (Zugriff am: 09.01.2018).

¹⁵⁰ Ebd.

¹⁵¹ Vgl. ebd.

Belichtungszeit von $\frac{1}{50}$ Sekunde eingestellt, ergibt sich für das X-Frame eine Belichtungszeit von $\frac{1}{200}$ Sekunde. Dieser Faktor ist in ganzen Schritten von 1 bis 6 frei wählbar.¹⁵²

Eine Besonderheit von HDRx ist, dass zwei separate Videoströme innerhalb einer R3D¹⁵³ Datei gespeichert werden. Diese können in der Postproduktion separat weiterverarbeitet werden. Sie werden ebenfalls erst mittels der Software REDCINE-X PRO zu einem HDR-Video zusammengefügt. Hierfür kann zwischen den zwei verschiedenen Methoden „Simple Blend“ und „Magic Motion“ gewählt werden.¹⁵⁴

¹⁵² Vgl. RED (Hrsg.): RED 101. HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX, o.A.

¹⁵³ R3D ist das RAW-Format von RED Digital ma

¹⁵⁴ Vgl. RED (Hrsg.): RED 101. HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX, o.A.

6 Kameravergleich

Um die bereits beschriebenen Herangehensweisen zur Steigerung des Dynamikumfangs und Erzeugung von HDR-Material verschiedener Hersteller genauer zu untersuchen, wurde für diese Arbeit ein direkter Vergleich dreier Kameramodelle durchgeführt. Die Modelle verwenden jeweils mindestens eine der vorher genannten Herangehensweisen. Für die Verwendung einer Log-Funktion wurde vom Hersteller SONY eine PWM-F5 mit S-LOG2 und S-LOG3 gewählt. Die Kamera ALEXA XT Plus der Firma ARRI verwendet neben einer Log-Funktion zusätzlich die Dual Gain Technologie. Die HDR-Technologie wird in diesem Fall durch die RED EPIC-W vertreten.

6.1 Die verwendeten Kameras

Zunächst werden die verwendeten Kameras aufgrund der Herstellerangaben vorgestellt. Für gleichbleibende Testbedingungen wird bei allen Kameras dasselbe Objektiv verwendet. Hierbei handelt es sich um ein CP.2 21mm/T2.9 des Herstellers ZEISS. Die Blendeinstellung dieses Objektivs reicht von T 2.9 bis T22¹⁵⁵.

6.1.1 ARRI ALEXA XT Plus

Die ALEXA XT Plus ist eine Digitalkamera mit einem Sensor für Kinobilder im 35mm Format. Dieser Sensor wird von ARRI als 35mm-ALEV-III-CMOS beschrieben und verwendet für die Farbdetektion einen Bayer-Farbfiler. Eine Vorschau erfolgt, wie bei allen verwendeten Kameras, mit Hilfe eines elektronischen Suchers, sowie einem oder mehreren SDI-Ausgängen.¹⁵⁶ ARRI gibt an: „Die ALEXA XT Plus (XT = Xtended Technology) ist die vielseitigste und flexibelste Kamera der Modellreihe ALEXA XT und damit eine echte Allrounderin.“¹⁵⁷ Somit stellt die ALEXA XT den Nachfolger der ALEXA CLASSIC dar. Das Plus im Namen gibt eine erweiterte Ausführung der XT an.¹⁵⁸ Sie bietet bei einem Seitenverhältnis von 16:9 eine maximale Auflösung von 3,2K mit 3168x1778 Pixel. Die größtmögliche Auflösung kann im Open Gate-Modus mit 3414x2198 Pixel erreicht werden. Der Open Gate-Modus verwendet den gesamten nutzbaren

¹⁵⁵ Vgl. ZEISS (Hrsg.): ZEISS Compact Prime CP.2 Lenses. Compact and Lightweight lenses with Interchangeable Mount System, o.A., URL: <https://www.zeiss.de/camera-lenses/matografie/products/compact-prime-cp2-lenses.html> (Zugriff am: 17.01.2018)

¹⁵⁶ Vgl. ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Technische Daten, o.A., URL: http://www.arri.com/de/camera/alexa/kameras/kamera_details/alexa-xt-plus/subsection/technical_data/ (Zugriff am: 16.01.2018)

¹⁵⁷ ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Übersicht o.A., URL: http://www.arri.com/de/camera/alexa/kameras/kamera_details/alexa-xt-plus/subsection/overview/ (Zugriff am: 16.01.2018)

¹⁵⁸ Vgl. ebd.

Sensorbereich und ist nur unter Verwendung von ARRI RAW möglich. Für Seitenverhältnisse von 16:9 und 4:3 wird jeweils nur der entsprechende Teil des Sensors verwendet.¹⁵⁹

Der Dynamikumfang der ALEXA XT Plus wird mit 14 Blendenstufen angegeben. Dieser ist, laut ARRI, unabhängig von der eingestellten Sensorempfindlichkeit. Diese reicht von einem Belichtungsindex 160 bis 3200ASA. Eine Besonderheit hierbei ist, dass mit diesem die Verteilung der 14 Blendestufen über und unter 18 prozentigem Grau gesteuert werden kann.¹⁶⁰

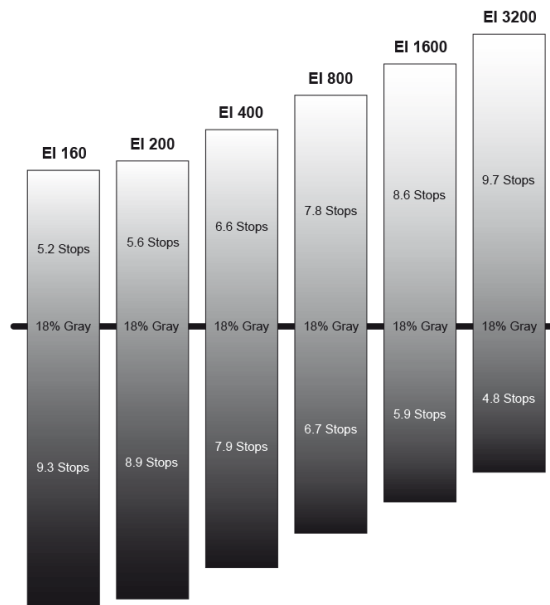


Abbildung 9: Verteilung der 14 Stops bei unterschiedlichen Belichtungsindexen
 Quelle: ARRI (Hrsg.): ALEXA XT. Exposure Latitude, o.A., URL: http://www.arri.com/fileadmin/media/arri.com/camera/Digital_Cameras/ALEXA_XT/exposure-latitude_2015.png (Zugriff am: 07.02.2018)

In Abbildung 9 ist erkennbar, dass die neutralste Verteilung dieser Blendenstufen bei einem Belichtungsindex von 800 erreicht ist. Daher wird diese Einstellung für den Vergleich der Modelle verwendet.

Die interne Verarbeitung der ALEXA XT Plus erfolgt linear mit 16Bit. Für eine Einstellung der OETF kann zwischen den Gammaprofilen LogC und Rec.709 gewählt werden.¹⁶¹

6.1.2 RED EPIC-W

¹⁵⁹ Vgl. ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Merkmale, o.A., URL: http://www.arri.com/de/camera/alexa/kameras/kamera_details/alexa-xt-plus/subsection/xt_plus_features/ (Zugriff am: 16.01.2018)

¹⁶⁰ Vgl. ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Technische Daten, o.A.

¹⁶¹ Vgl. ebd.

Die verwendete Kamera des Herstellers RED trägt den Namen RED EPIC-W. Diese verwendet den sogenannten HELIUM 8K Sensor, welcher eine maximale, effektive Auflösung von 8K mit 8192x4320 Pixeln bietet.¹⁶² Hierbei verwendet nur diese Einstellung den gesamten nutzbaren Sensor. Bei kleineren Auflösungen wird ein, der Auflösung entsprechender, kleinerer Sensorbereich verwendet.¹⁶³

Mit der Aussage: „Because here at RED we are not limited to a sweetspot of ISO performance, but rather a range between around 400 and 2000 ISO.“¹⁶⁴, verzichtet RED auf eine genaue Angabe einer nativen ISO und gibt stattdessen einen Bereich von 400 bis 2000 ISO an.¹⁶⁵ Der angegebene Dynamikumfang der RED EPIC-W mit HELIUM 8K Sensor liegt bei 16,5+ Blendenstufen.¹⁶⁶ Da in dem Artikel „HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX“ auf der Webseite von RED ein Dynamikumfang von 13 Blendenstufen im „normalen“ Modus angegeben wird¹⁶⁷, kann angenommen werden, dass die Angabe von 16,5+ Stufen eine Verwendung von HDRx voraussetzt.

Durch die neue IPP2 ist die Auswahl des Farbraums, sowie der OETF auf den RWG-Farbraum und die Log3G10 Log-Kurve festgelegt.¹⁶⁸

6.1.3 SONY PWM-F5

Auch die SONY PWM-F5 verwendet wie die anderen Modelle einen CMOS-Sensor. Dieser wird bei SONY mit einer Größe entsprechend von Super-35mm Film und einem Seitenverhältnis von 17:9 angegeben. Dieser weist mit effektiv 8,9 Megapixel eine Auflösung von maximal 4K mit 4096x2160 Pixel auf.¹⁶⁹

Der Dynamikumfang der Kamera wird mit 14 Blendenstufen angegeben. Die native ISO für S-LOG liegt bei 2000.¹⁷⁰

Hier kann aus einer Vielzahl von Übertragungsfunktionen wie S-LOG2, S-LOG3, Standard, sowie verschiedenen Hypergammas gewählt werden.¹⁷¹

¹⁶² Vgl. RED (Hrsg.): RED EPIC-W, o.A., URL: <http://www.red.com/products/epicw-8k#techspecs> (Zugriff am: 16.01.2018)

¹⁶³ Vgl. RED (Hrsg.): UNDERSTANDING SENSOR CROP FACTORS, o.A., URL: <http://www.red.com/learn/red-101/sensor-crop-factors> (Zugriff am: 05.02.2018)

¹⁶⁴ RED (Hrsg.) (2016) Video, veröff. bei Red.com am 15.12.2016, URL: <http://www.red.com/learn/red-tech/red-tech-iso-settings> (Zugriff am: 16.01.2018) Hier 0:39 - 0:47.

¹⁶⁵ Vgl. ebd.

¹⁶⁶ Vgl. RED (Hrsg.): RED EPIC-W, o.A.

¹⁶⁷ Vgl. RED (Hrsg.): RED 101. HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX, o.A.

¹⁶⁸ Vgl. RED (Hrsg.): IPP2: IMAGE PIPELINE STAGES, o.A.

¹⁶⁹ Vgl. SONY (Hrsg.): PMW-F5. Genial vielseitig, o.A., URL: <https://www.sony.de/pro/product/broadcast-products-camcorders-digital-motion-picture-camera/pmw-f5/overview/> (Zugriff am: 16.01.2018)

¹⁷⁰ Vgl. ebd.

¹⁷¹ Vgl. ebd.

6.2 Der Versuchsaufbau

Der Kameravergleich wurde in zwei unterschiedliche Testszenarien unterteilt. Zunächst wurden alle Kameramodelle mit Hilfe eines Testcharts zur Messung des Dynamikumfangs untersucht. Dieser erste Test galt zur exakten Bestimmung des Dynamikumfangs der verschiedenen Kameramodelle. Hierfür wurden, je nach Modell, unterschiedliche Einstellungsmöglichkeiten verwendet, um den größtmöglichen Dynamikumfang feststellen zu können.

Das zweite Testszenario kann als szenischer Test bezeichnet werden. Hierbei wurde untersucht, wie die sich die Modelle und Einstellungsmöglichkeiten bei einer realen Szene verhalten.

6.2.1 Vergleich des Dynamikumfangs via Testchart

Der Testchart

Für die exakte Bestimmung des Dynamikumfangs wurde ein Testchart des Herstellers Image Engineering verwendet. Diese trägt die Bezeichnung TE223 A. Die Kennzeichnung A beschreibt in diesem Fall einen intransparenten, reflektierenden Testchart.

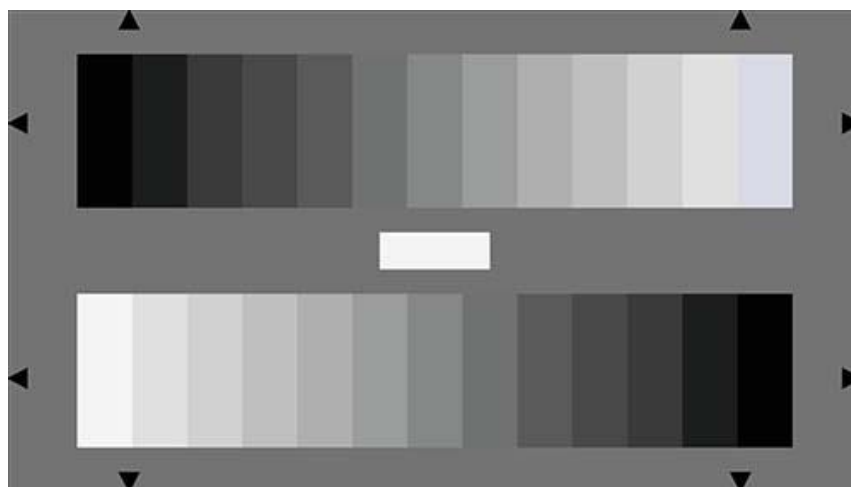


Abbildung 10: Testchart TE223 A
Quelle: Image Engineering (Hrsg.): TE223 A. data sheet

Wie in Abbildung 10 zu erkennen, besteht dieser Testchart aus zwei mal 13 Graustufen in logarithmischer Abfolge. Diese befinden sich auf einem grauen Hintergrund mit einer Dichte von $D=0,75$, beziehungsweise einem Reflexionsgrad von 18%. Der mittlere,

weiße Bereich zwischen den Grauskalen ist angegeben mit einem Reflexionsgrad von 89%. Der gesamte Kontrastumfang der Testchart beträgt 200:1.¹⁷²

Die Dichte, sowie der Reflexionsgrad der 13-stufigen Grauskalen ist wie folgt verteilt:

Stufe	Dichte	Reflexion in %	Stufe	Dichte	Reflexion in %
1	0,05	89	8	0,78	17
2	0,13	74	9	0,95	11
3	0,21	62	10	1,15	7
4	0,30	50	11	1,41	4
5	0,40	40	12	1,77	2
6	0,51	31	13	2,35	0,5
7	0,63	23	-	-	-

Tabelle 2: Verteilung Grauskala, TE223 A
Quelle: Image Engineering (Hrsg.): TE223 A. data sheet

Aufbau und Vorgehensweise

Als Grundlage für den durchgeführten Test galt eine von ARRI vorgestellte Messmethode. Diese beschreibt eine Testsituation bestehend aus einem Testchart, besonderen Highlights sowie „echte[n] Gesichter[n]“¹⁷³, um die Hauttöne und Farbwiedergabe beurteilen zu können. Die Testsituation wird dann mit einer Belichtungsreihe von minimum +5 bis -5 Stops aufgezeichnet. Anschließend wird in der Postproduktion das aufgezeichnete Material wieder auf die Belichtung mit ± 0 Stops Über- und Unterbelichtung angepasst. Die über- und unterbelichteten Clips sollen ab einem bestimmten Punkt der Belichtungsreihe clipping in den hellen und Rauschen in den dunkeln Bildbereichen aufweisen.¹⁷⁴ Die Differenz der Punkte an denen clipping und zu starkes Rauschen auftreten, gibt den Dynamikbereich der Kamera in Blendenstufen an. Da sich der durchgeführte Test lediglich auf den zu messenden Dynamikumfang bezieht, wurde auf die Verwendung von Hauttönen verzichtet und lediglich der oben aufgeführte Testchart verwendet.

¹⁷² Vgl. Image Engineering (Hrsg.): TE223 A. data sheet, o.A., URL: https://www.image-engineering.de/content/products/charts/te223/downloads/TE223_A_data_sheet.pdf (Zugriff am: 16.01.2018)

¹⁷³ ARRI (Hrsg.): The best for HDR since 2010 o.A.

¹⁷⁴ Vgl. ebd.

Der Testaufbau besteht aus der jeweiligen Kamera, zwei Kunstlicht Flächenleuchten mit jeweils einem Kilowatt, einem Waveform-Monitor (WFM), zwei Monitoren, sowie dem oben genannten Testchart. Dieser wird mit Hilfe der Flächenleuchten gleichmäßig ausgeleuchtet. Hierfür wird der Testchart auf einem C-Stand in ca. einem Meter Höhe, gemessen an der Unterkante, aufgestellt. Die jeweilige Kamera befindet sich zu diesem in einem Abstand von ebenfalls ca. einem Meter. Dieser muss je nach Kameratyp minimal variiert werden, um eine vollständige Abbildung der Testchart gewährleisten zu können. Die Flächenleuchten befinden sich unmittelbar hinter und über der Kamera. Mit einem Belichtungsmesser der Firma GOSSEN wird regelmäßig sichergestellt, dass eine gleichmäßige Beleuchtung kontinuierlich bestehen bleibt. Ein ungleichmäßig ausgeleuchteter Testchart würde die Testergebnisse verfälschen, weil damit das korrekte Verhältnis der Graustufen zueinander nicht bestehen bleibt. Durch die Verwendung von sogenanntem Blackwrap (schwarze Aluminiumfolie) an der Unterkante der Flächenleuchten, kann die Kamera vor Licht und entstehender Wärme der Kunstlichtlampen geschützt werden. Dies ist Nötig, um die Kameras auf Arbeitstemperatur zu halten und diese nicht zu überschreiten. Eine Überschreitung kann zu verstärktem Rauschen des Sensors führen.

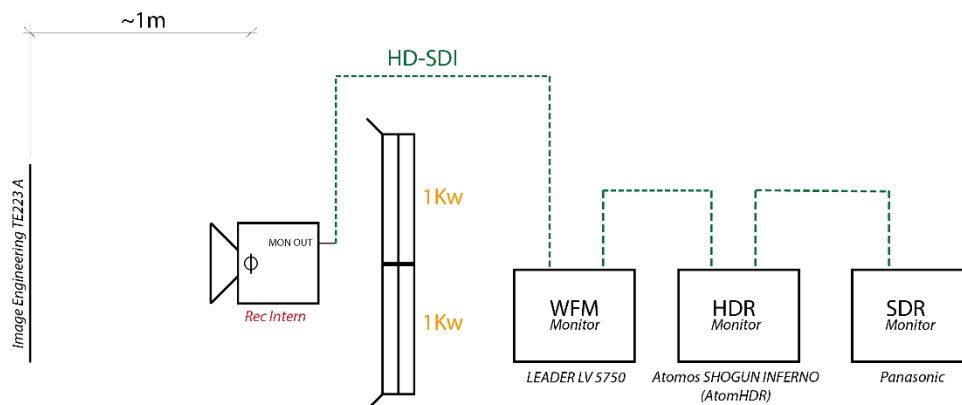


Abbildung 11: Der Testaufbau mit Testchart
Quelle: Eigene Abbildung

Der Testvorgang wird aufgrund der Belichtungsreihe in zwei Durchgänge pro Kamera und Einstellung unterteilt. Der erste Durchgang umfasst eine Belichtungsreihe von ± 0 Stops bis +7 Stops Überbelichtung, der zweite von ± 0 bis -7 Stops Unterbelichtung.

Für den ersten Durchgang wurde beispielsweise zunächst die Blende des Objektivs auf die größte Blendenzahl und damit die kleinste Blendenöffnung eingestellt. Bei dem verwendeten Objektiv nimmt diese, wie die meisten Cine-Objektiven, einen Wert von T22 an. Nun werden mittels eines Dimmers die Leistungen der Leuchten so angepasst, dass eine korrekte Belichtung bei diesem Blendenwert erreicht wird.

Eine korrekte Belichtung ist erreicht, wenn das Hintergrundgrau (mittleres Grau) der Testchart, mit einem Reflexionsgrad von 18% den vom Hersteller angegebenen Code- oder Prozentwert entspricht. So ist beispielsweise bei Rec.709 mittleres Grau mit einem

Prozentwert von 40,9% (oftmals mit 41% angegeben) definiert. Dieser Wert ist von Hersteller und Einstellung abhängig. Die Definition der Hersteller richtet sich nach dessen Interpretation der Übertragungskurven und befindet sich oftmals tiefer, als der Referenzwert bei Rec.709.¹⁷⁵ Blain Brown beschreibt dies in seiner Monografie: „(...) the manufacturer can place 18% gray wherever they think they get the most dynamic range out of the curves. More often than not they place it farther down the curve to increase highlight retention, but this is not always the case.“¹⁷⁶

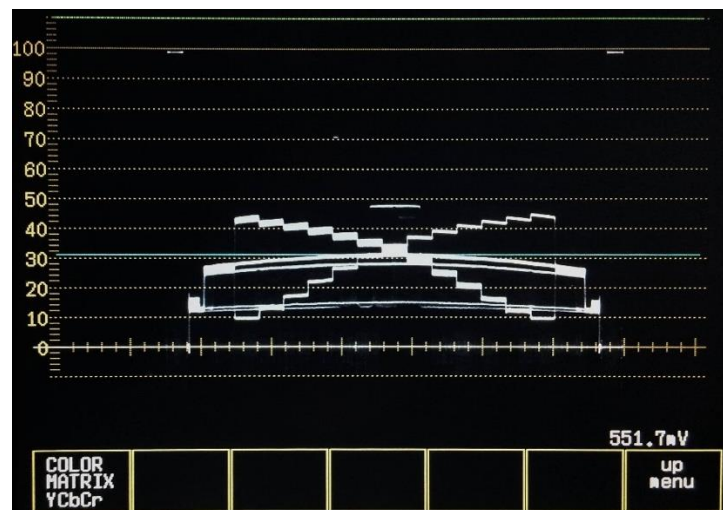


Abbildung 12: WFM-Monitor, SONY PWM-F5 mit S-Log2
Quelle: Eigene Abbildung

Zur exakten Überprüfung wird diese Einstellung mittels eines WFM gemessen. In Abbildung 12 ist das Videosignal der SONY PWM-F5 mit einer S-Log2 Übertragungsfunktion dargestellt. Die lange, mittlere Linie wird durch das mittlere Grau der Testchart erzeugt. Die Beugung dieser ist auf die Vignettierung des Objektivs zurückzuführen. Vignettierung wird ebenfalls als Randlichtabfall bezeichnet. Dies bedeutet, dass zu den Rändern des Bildes die Abbildungsleistung und damit unter anderem auch die Helligkeit eines Objektivs abfällt. Daher wird die Mitte dieser Linie, die gleichzeitig auch die Mitte des Objektivs ist an der keine Vignettierung stattfindet, auf den angegebenen Prozentwert des Herstellers gebracht. In diesem Fall gibt SONY vor, dass für eine korrekte Belichtung mittleres Grau bei der S-Log2 Übertragungsfunktion bei 32% liegen muss.

Sind diese Einstellungen korrekt vorgenommen, wird die Kamera ausgelöst und ein Clip aufgezeichnet. Dieser gilt als Referenz für die weiteren Überbelichtungen. Nun wird die Blende des Objektivs schrittweise um eine Stufe geöffnet. Eine Vergrößerung der Blende um eine Stufe, verdoppelt die auf den Sensor treffende Lichtmenge und erzeugt damit

¹⁷⁵ Vgl. Brown (2015): S.90f

¹⁷⁶ Ebd.

eine Überbelichtung von plus einem Stop. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis der Blendenzahlwert T2.9 und somit eine Überbelichtung von +6 Stops erreicht ist. Eine zusätzliche Überbelichtung von einem Stop kann erreicht werden, indem die Verschlusszeit der Kamera halbiert wird. Alle vorherigen Aufnahmen wurden mit $\frac{1}{50}$ Sekunde belichtet. Somit ergibt sich für die siebte Überbelichtung eine Verschlusszeit von $\frac{1}{25}$ Sekunde, um erneut die Lichtmenge zu verdoppeln. Mit diesem Vorgang ergibt sich eine Belichtungsreihe aus 8 Stufen, beginnend bei korrekter Belichtung bis +7 Stops Überbelichtung. Aus Tabelle 3 lassen sich die jeweiligen Zwischenstufen auslesen.

Clip-Nummer	Blendenzahl	Verschlusszeit in Sekunden	Überbelichtung in Stops
1	T 22	$\frac{1}{50}$	0
2	T 16	$\frac{1}{50}$	+1
3	T 11	$\frac{1}{50}$	+2
4	T 8	$\frac{1}{50}$	+3
5	T 5.6	$\frac{1}{50}$	+4
6	T 4	$\frac{1}{50}$	+5
7	T 2.9	$\frac{1}{50}$	+6
8	T 2.9	$\frac{1}{25}$	+7

*Tabelle 3: Belichtungsreihe, Charttest, 1. Durchgang
Quelle: Eigene Darstellung*

Dieses Vorgehen wird in umgekehrter Reihenfolge für den zweiten Durchgang wiederholt. In umgekehrter Reihenfolge bedeutet in diesem Fall, dass bei einer Blende von T2.9 und einer Belichtungszeit von $\frac{1}{25}$ Sekunde begonnen wird. Nun wird für diese Einstellung die Helligkeit der Leuchten so weit gedimmt, dass eine korrekte Belichtung erreicht ist. Für die erste Unterbelichtung dieser Reihe wird zunächst die Verschlusszeit auf $\frac{1}{50}$ Sekunde verdoppelt. Anschließend wird die Blende des Objektivs schrittweise geschlossen. Die maximale Unterbelichtung, die mit Hilfe dieses Vorgangs erreicht werden kann, beträgt -7 Stops bei einer Blendenzahl von T22. Somit ergibt sich mit beiden

Durchgängen eine Belichtungsreihe von -7 bis +7 Stops und überschreitet damit die von ARRI empfohlene Vorgabe von -5 bis +5 Stops¹⁷⁷ um jeweils zwei Blendenstufen.

Durch diesen Testaufbau zur Ermittlung des Dynamikumfangs, sollen die Wirkungsweisen und die Effektivität der von den Herstellern verfolgten Ansätzen zur Steigerung des Dynamikumfangs verglichen werden. Besonders sollen die verschiedenen Kameras auf ihre tatsächlichen Dynamikumfänge untersucht werden. In der Auswertung sollen dann folgende Thesen verifiziert, beziehungsweise falsifiziert werden:

1. **Die Dual Gain Technologie von ARRI, sowie der HDRx-Modus von RED, werden einen höheren Dynamikumfang erzielen, als die Verwendung von S-Log2 und S-Log3 des Herstellers SONY.**
2. **Ohne Verwendung von HDRx wird die RED EPIC-W einen niedrigeren Dynamikumfang aufweisen, als die ARRI ALEXA.**
3. **Die HDRx-Technologie von RED wird bei einem Faktor von 2, ein vergleichbares Ergebnis bezüglich des Dynamikumfangs erreichen wie die ARRI ALEXA.**
4. **S-Log2 wird eine höhere Dynamik in den dunklen, S-Log3 hingegen in den hellen Bildbereichen aufweisen.**

6.2.2 Szenischer Test

Da der Vergleich des Dynamikumfangs mittels eines Testcharts ausschließlich theoretische Ergebnisse liefert, wurde für eine praxisnähere Auswertung zusätzlich ein szenischer Test durchgeführt. Dieser basiert aus technischer Sicht, bezüglich des Aufbaus, auf denselben Geräten. Zur Beleuchtung wird hierfür jedoch eine einzelne Kunstlicht PAR-Leuchte mit einem Kilowatt Leistung verwendet. Diese beleuchtet als Gegenlicht einen Kickertisch aus etwa zwei Meter Entfernung. Diese Szene wurde gewählt, da durch das Gegenlicht der Leuchte ein hoher Szenenkontrast erzeugt werden kann. Dieser ergibt sich aus sehr dunklen Bildbereichen innerhalb der Schatten, sowie den dunklen Spielfiguren. Helle Bildbereiche ergeben sich aus der leichten Spiegelung der Oberfläche, sowie den strahlenden Reflexionen der Chromteile. In Abbildung 13 ist dieser Testaufbau fotografisch dargestellt.

Ein weiterer Grund für die Wahl dieser Szene ist, dass hiermit eine sehr schnelle Bewegung kontrolliert stattfinden kann. Eine solche schnelle, aber kontrollierbare Bewegung ist nötig, um folgende These untersuchen zu können:

¹⁷⁷ ARRI (Hrsg.): The best for HDR since 2010 o.A.

Bei Verwendung von HDRx werden unabhängig des Faktors Bewegungsartefakte sichtbar.

Diese These bezieht sich auf das HDRx von RED und die damit verbundenen unterschiedlichen Belichtungszeiten der A- und X-Frames. Die Bewegungsartefakte werden sich in unterschiedlich starker Bewegungsunschärfe zeigen und damit in einem Ghosting-Effekt resultieren.



*Abbildung 13: Aufbau des szenischen Tests
Quelle: Eigene Abbildung*

Durch eine Gegenlichtblende wird sichergestellt, dass mögliche Reflexionen innerhalb des Objektivs das Testergebnis nicht verfälschen. Reflexionen innerhalb des Objektivs, auch Lensflares genannt, senken die Abbildungsleistung des Objektivs bezüglich des Kontrastes erheblich. Auch hier wird durch eine Graukarte mit einem Reflexionsgrad von 18% eine korrekte Belichtung eingestellt.

Je Kamera und Einstellung wurden drei Schüsse mit der sich im Vordergrund befindlichen Spielfigur durchgeführt. Für die Auswertung werden die Schüsse mit der höchsten Übereinstimmung bezüglich der Geschwindigkeit verwendet.

6.3 Auswertung

Für die Auswertung wird die Software DaVinci Resolve 14 verwendet. Das Unternehmen Blackmagic Design behauptet, ihre Software sei „Hollywoods branchenführender Farbkorrektor!“¹⁷⁸ Die im Folgenden dargestellten WFM-Abbildungen sind unbearbeitete Screenshots der Kontrollmonitore aus der genannten Software.

6.3.1 Testchart

SONY PWM-F5

SONY bietet für die PWM-F5 eine große Anzahl an Einstellungsmöglichkeiten. Als Log-Übertragungsfunktionen bietet SONY S-Log2 und S-Log3 an. Daher wird für jede dieser Funktionen eine separate Belichtungsreihe aufgezeichnet.

Zunächst weisen beide Belichtungsreihen ähnliche Merkmale auf. Beide erreichen ein clipping bei einer Überbelichtung von +4 Stops. In die Unterbelichtung reichen beide Belichtungsreihen bis etwa -5 Stops. Durch die Differenz dieser beiden Begrenzungen ergibt sich ein gemessener Dynamikumfang bei beiden Einstellungen von etwa 10 Stops. Bei genauerer Betrachtung des WFM (Abbildung 14) hinsichtlich der Grenzwerte lässt sich feststellen, dass S-Log2 und S-Log3 dennoch deutliche Unterschiede aufweisen.

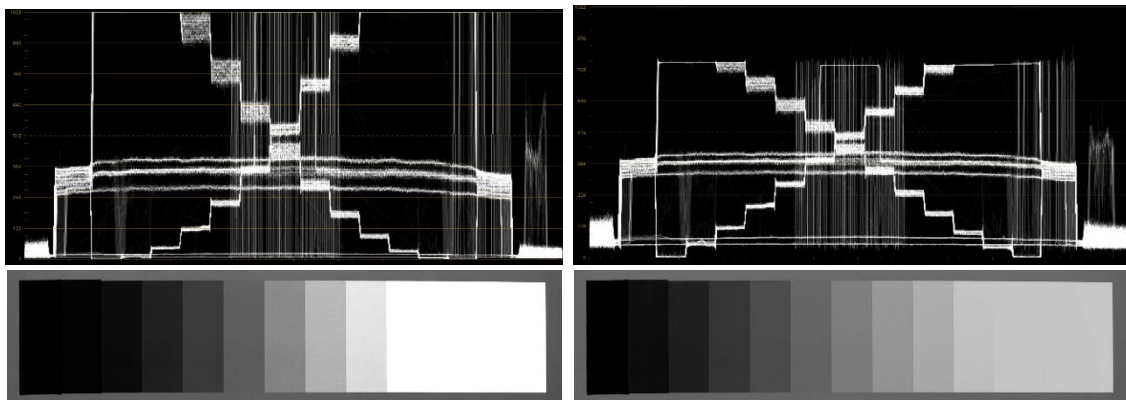


Abbildung 14: S-Log2 (links) und S-Log3 (rechts) bei +4 Stops Überbelichtung
Quelle: Eigene Abbildung

Bei S-Log2 können bei einer Überbelichtung von +4 Stops noch zwei Graustufen über mittlerem Grau vor dem clipping unterschieden werden. Bei S-Log3 dagegen ist eine weitere Graustufe vor dem clipping zu differenzieren. Daraus kann geschlussfolgert wer-

¹⁷⁸ Vgl. Blackmagic Design (Hrsg.): DAVINCI RESOLVE 14. PROGRESSIVE FARBKORREKTUR, o.A., URL: <https://www.blackmagicdesign.com/de/products/davinciresolve/color> (Zugriff am: 21.01.2018)

den, dass S-Log3 mehr Dynamik in den Highlights aufweist. Ein weiterer deutlicher Unterschied bildet sich in den Unterbelichtungen ab. So weist S-Log3 bei einer Unterbelichtung von -4 Stops bereits einen deutlich größeren Rauschanteil im Signal auf, als S-Log2. In Abbildung 15 wird erkennbar, dass durch dieses Rauschen eine Differenzierung der letzten zwei Stufen der Grauskala, bereits bei -4 Stops Unterbelichtung fast nicht möglich ist. Das erhöhte Rauschen von S-Log3 lässt auf eine schlechtere Qualität des Bildes in den dunklen Bildbereichen schließen. Bei der nächsten Unterbelichtung von -5 Stops lässt sowohl bei S-Log2, als auch bei S-Log3 das Rauschen keine Differenzierung der letzten Stufen mehr zu. Dennoch kann der geringere Rauschanteil von S-Log2 erkannt werden.

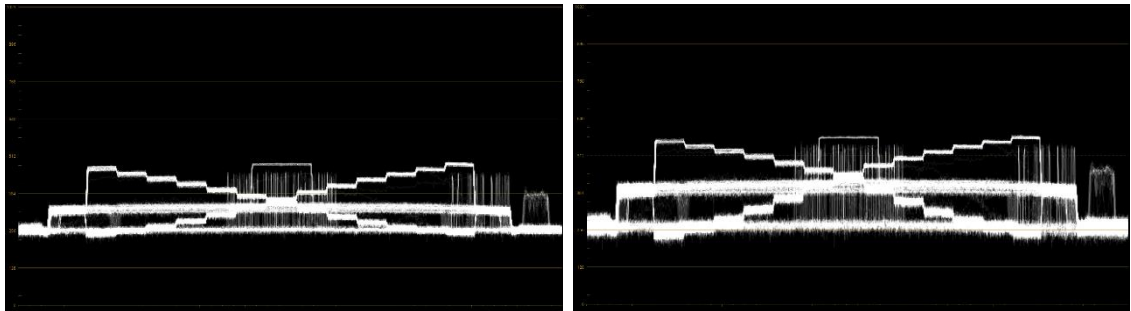


Abbildung 15: S-Log2 (links) und S-Log3 (rechts) bei -4 Stops Unterbelichtung
Quelle: Eigene Abbildung

Diese Erkenntnisse verifizieren die vierte These, dass S-Log3 ein schlechteres Rauschverhalten in dunkeln Bildbereichen aufweist als S-Log2, jedoch dafür eine höhere Dynamik im Umgang mit Highlights aufweist.

ARRI AELXA XT Plus

Im Gegensatz zur PWM-F5, welche bei einer Überbelichtung von bereits +4 Stops clippt, erreicht die ALEXA XT Plus bei ASA800 dies erst bei +7 Stops. Besonders ist hierbei, dass die vorhergegangene Belichtung von +6 Stops einen ähnlich niedrigen maximalen Codewert erreicht, wie die SONY PWM-F5 bei einer Belichtung von +3 Stops unter Verwendung von S-Log3. Hieraus lässt sich feststellen, dass die ALEXA einen deutlich besseren Dynamik für helle Bildbereiche aufweist. Wie in Abbildung 16 zu erkennen, liefert sie selbst bei einer Überbelichtung von +6 Stops nach einer Korrektur der Luminanz ein qualitativ hochwertiges Bild.

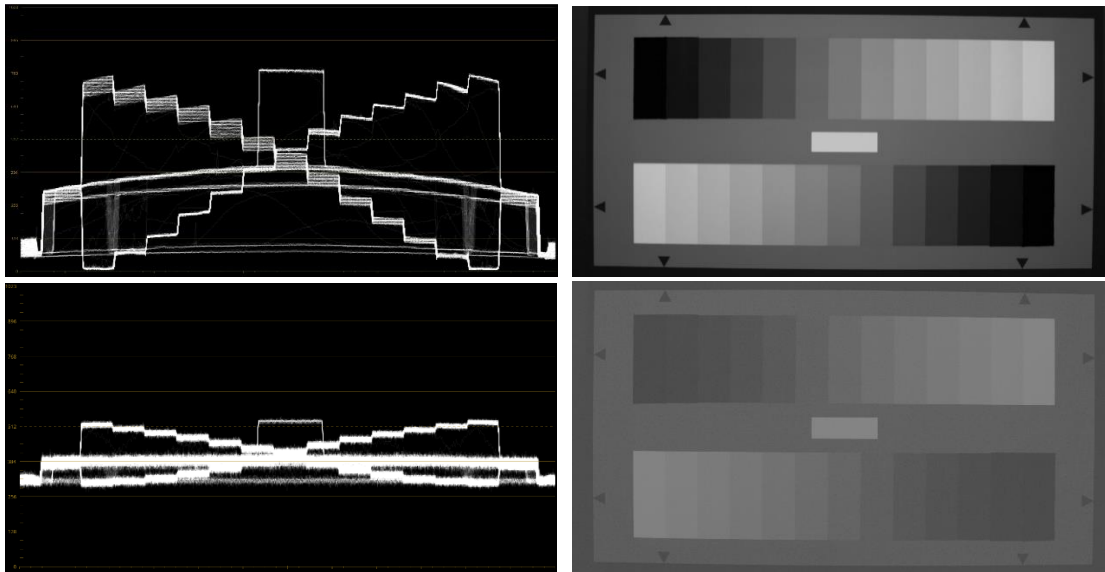


Abbildung 16: ALEXA Plus bei +6 Stops (oben) und -4 Stops (unten)
Quelle: Eigene Abbildung

Die ALEXA XT Plus erreicht, ebenfalls wie die PWM-F5 in der Unterbelichtung einen Wert von -5 Stops. Damit ist eine Differenzierung der letzten zwei Stufen der Grauskala, trotz des starken Rauschens, bei -4 Stops noch möglich. Jedoch ist hier der Wertunterschied zwischen der letzten und vorletzten Stufe sehr gering. Daher weist die Alexa eine leicht geminderte Dynamik in dunklen Bildbereichen im Vergleich zur PWM-F5 auf. Zusammengefasst ergibt sich trotzdem, durch das deutlich spätere clipping in den Highlights, ein erheblich höherer Dynamikumfang von zusätzlichen 3 Stops. Dieser beträgt bei der ALEXA XT Plus mit der korrekten Belichtungsstufe von ± 0 insgesamt 13 Stops.

Bei einer zweiten Belichtungsreihe mit ASA160 kann festgestellt werden, dass die ALEXA XT Plus den Dynamikumfang bei unterschiedlichen Sensorempfindlichkeiten nicht beibehält und damit nicht nur die Verteilung der Graustufen über und unter 18% Grau beeinflusst. Hierfür konnte, aufgrund der nicht ausreichenden Beleuchtungsstärke der Flächenleuchten das bisher genutzte Objektiv nicht verwendet werden. Deshalb kam ein lichtstärkeres Objektiv mit einer maximalen Blendenöffnung von T1.9¹⁷⁹ zum Einsatz, welches die Bezeichnung UP 20mm / T1.9 trägt. Hersteller dieses Objektivs ist ZEISS in Kooperation mit ARRI. So tritt bei der Verwendung von ASA160 zwar ein clipping bereits bei +5 Stops Überbelichtung ein. Trotz des deutlich geringeren Rauschanteils, lassen sich bei einer Unterbelichtung von -6 Stops die letzten zwei Stufen der Skala nicht mehr differenzieren. Geht man davon aus, dass die ALEXA den Dynamikumfang von 13 Stops

¹⁷⁹ Vgl. ZEISS (Hrsg.): ARRI / ZEISS Ultra Prime Lenses. Highest performance over the entire focusing range, o.A., URL: <https://www.zeiss.de/camera-lenses/cinematografie/products/ultra-prime-lenses.html> (Zugriff am 07.02.2018)

beibehält, müsste mit einem clipping bei +5 Stops, eine Unterscheidung der letzten Stufen bei -6 Stops noch möglich sein. Dies ist jedoch nicht der Fall. Mit den Grenzen der Differenzierung der Graustufen bei +5 und -6 Stops, ergibt sich an dieser Stelle lediglich ein Dynamikumfang von 12 Stops.

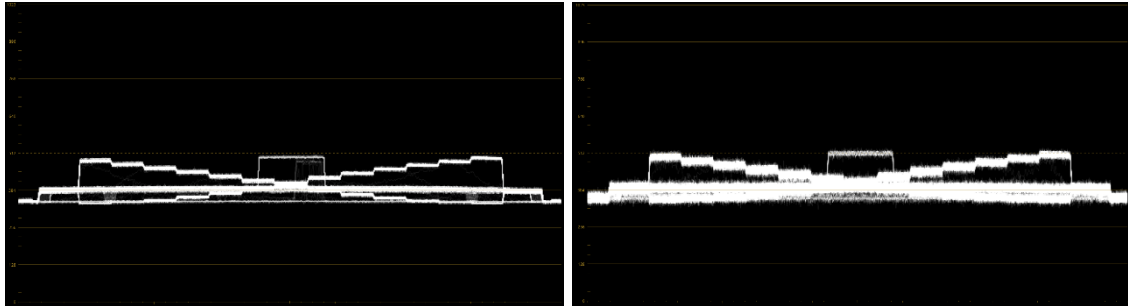


Abbildung 17: ALEXA, ASA160 (links) und ASA800 (rechts) bei -5 Stops
Quelle: Eigene Abbildung

In Abbildung 17 ist das Rauschen der dunklen Bildbereiche für ASA160 und ASA800 gegenübergestellt. Es kann festgestellt werden, dass durch das starke Rauschen bei ASA800 eine Unterscheidung der letzten Stufen nicht mehr möglich ist. Bei ASA160 dagegen ist eine Differenzierung gerade noch möglich.

RED EPIC-W

Da die RED EPIC-W zwei separate Videoströme innerhalb einer RAW-Datei aufzeichnet, welche erst in der Postproduktion zu einem HDR-Video zusammengefügt werden, wird für die folgende Auswertung eine weitere Software benötigt. Für diesen und andere Zwecke stellt RED das Programm REDCINE-X PRO auf ihrer Webseite kostenlos zur Verfügung.

Wird eine R3D-Datei, welche die zwei HDRx-Videoströme enthält, in das Programm geladen, wird diese von REDCINE-X PRO automatisch als HDR erkannt. Der bei der Aufnahme eingestellte Faktor kann dann in den Metadaten der Datei ausgelesen werden. Im Bereich „Look“ ist damit der Bearbeitungsmodus HDRx aktiviert. Hier kann aus zwei unterschiedlichen Kombinationsmethoden der zwei Belichtungen, sowie der Möglichkeit nur A- oder X-Frame zu verwenden, gewählt werden. Als Kombinationsmethoden stehen die Modi „Simple Blend“ und „Magic Motion“ und zusätzlich pro Methode ein Regler von -1 bis +1 zur Verfügung. Dieser regelt bei Verwendung der „Simple Blend“-Methode die jeweilige Gewichtung der A- und X-Frames. Hierbei werden bei einer Stellung von 0 beide Bilder gleichmäßig gewichtet. Eine Stellung von -1 beziehungsweise +1 bewirkt, dass lediglich nur das X-Frame, beziehungsweise das A-Frame verwendet wird. Die „Magic Motion“-Methode verwendet erst ab einem festgesetzten Helligkeitswert das X-

Frame für die hellen Bildbereiche. Mit dem Regler kann hier dieser Helligkeitswert verändert werden.¹⁸⁰

Zur Auswertung wurden die jeweiligen HDRx-Einstellungen, ohne Berücksichtigung des Reglers, mit Hilfe von REDCINE-X PRO auf die RAW-Dateien angewendet und exportiert, um dann in DaVinci Resolve 14 korrigiert zu werden. Für den Export wurde der nahezu verlustfreie Codec ProRes4444 gewählt. Dieser Codec wurde ebenfalls für die interne Aufzeichnung der ARRI ALEXA XT Plus verwendet.

Bereits ohne die Verwendung der HDRx-Technologie erreicht die RED EPIC-W vergleichbare Werte wie die ALEXA XT Plus. So erreicht auch die RED erst bei +7 Stops Überbelichtung das clipping. Eine Unterscheidung der letzten zwei Stufen ist jedoch schon bei -4 Stops nicht mehr möglich.

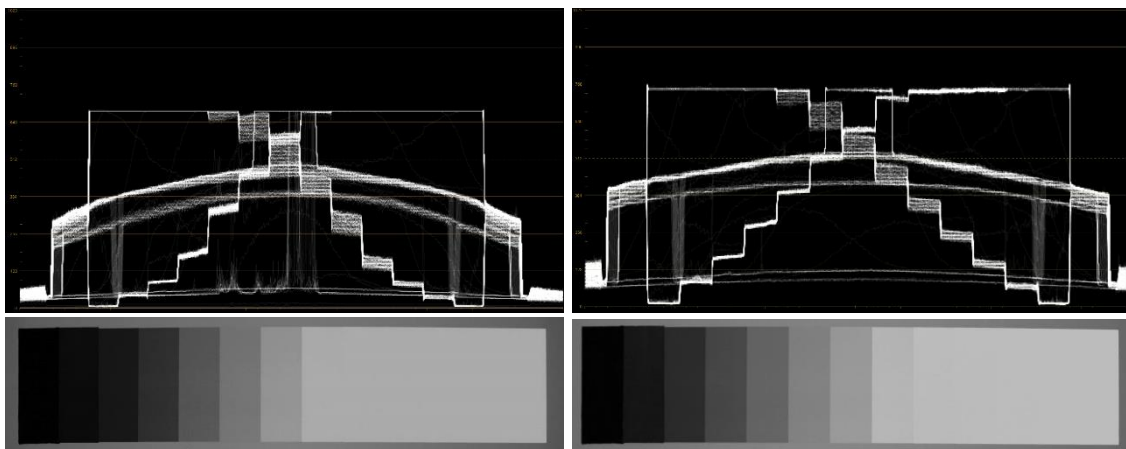


Abbildung 18: ALEXA (links) und EPIC-W ohne HDRx (rechts) bei +7 Stops
Quelle: Eigene Abbildung

Vergleicht man jedoch die Bilder des WFM sowie die aufgezeichneten Grauskalen der beiden Kameras bei +7 Stops in Abbildung 18, kann festgestellt werden, dass bei der ALEXA lediglich die fünf hellsten Stufen der Grauskala die gleiche Helligkeit aufweisen. Im Vergleich ist dies bei RED mit den sechs hellsten Stufen der Fall. Daraus ergibt sich, dass die ALEXA durch eine weitere unterscheidbare Graustufe, eine minimal höhere Dynamik in den Highlights aufweist. Vergleicht man die Leistung der Kameras in den dunklen Bildbereichen, beispielsweise bei einer Unterbelichtung von -5 Stops, kann bestimmt werden, dass die ALEXA ein höheres Rauschen vorweist und dennoch eine minimale Differenzierung der letzten zwei Stufen möglich ist.

¹⁸⁰ Vgl. RED (Hrsg.): RED 101. HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX, o.A.

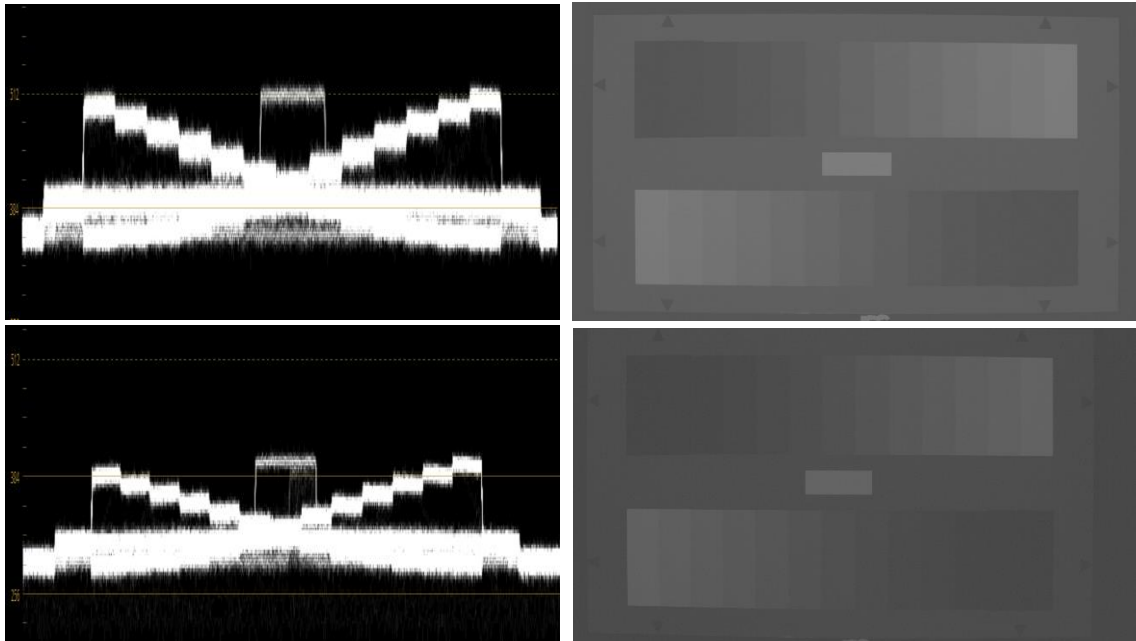


Abbildung 19: AELXA, ASA800 (oben) und EPIC-W, (kein HDRx) bei -5 Stops (unten)
Quelle: Eigene Abbildung

Mit dieser Untersuchung kann die zweite These, dass ohne eine Verwendung von HDRx die RED EPIC-W einen niedrigeren Dynamikumfang aufweist, als die ARRI ALEXA verifiziert werden. Im direkten Vergleich weist die ARRI ALEXA einen Dynamikumfang von 13 und RED EPIC-W nur einen von 12 Blendenstufen auf.

Unter der Verwendung von HDRx vergrößert die RED EPIC-W ihren Dynamikbereich erheblich. So überschreitet sie bereits bei einem HDRx-Faktor von 2, den Dynamikumfang der ARRI ALEXA XT Plus. Damit falsifiziert sich die dritte These des Verfassers. Diese besagte, dass die HDRx-Technologie von RED bei einem Faktor 2, ein vergleichbares Ergebnis bezüglich des Dynamikumfangs erreicht wie die ARRI ALEXA XT Plus.

Ein clipping konnte selbst mit einer Überbelichtung von +7 Stops bei Verwendung von HDRx schon mit einem Faktor 2 nicht erreicht werden. Durch den Faktor 2, welcher laut RED angibt, dass die Dynamik in den Highlights um 2 Stops gesteigert wird, geht der Verfasser davon aus, dass ein clipping bei einer Überbelichtung von +9 Stops eintreten wird. Die Begrenzung des Dynamikumfangs in den dunklen Bildbereichen befindet sich ebenfalls bei einer Unterbelichtung von -4 Stops. In Abbildung 20 wird dabei deutlich, dass bei der Verwendung von HDRx eine Differenzierung der Stufen 11 und 12 der Skala bereits ungenau wird. Diese beiden Stufen sind, wenn kein HDRx verwendet wird, noch deutlich voneinander zu unterscheiden.

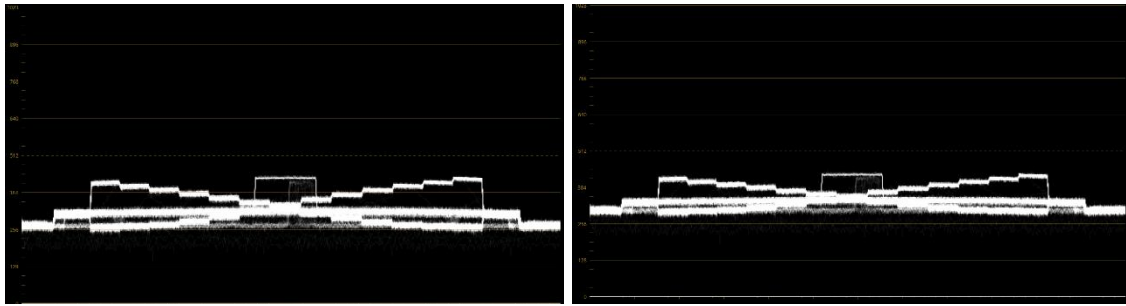


Abbildung 20: EPIC-W ohne HDRx (links) und mit HDRx-Faktor 2 (rechts)
Quelle: Eigene Abbildung

Wird ein HDR-Faktor von 6 verwendet, wird der Dynamikumfang laut RED, um insgesamt 6 Stops erweitert. Da ebenfalls ohne die Verwendung von HDRx ein clipping bei +7 Stops erreicht ist und dieser Wert durch den Faktor 6 um ebenfalls 6 Stops erweitert werden soll, geht der Verfasser davon aus, dass ein clipping bei +13 Stops erreicht sein wird. Stellt man die WFM-Bilder bei der maximalen Überbelichtung der verschiedenen Faktoren gegenüber, kann zumindest eine Aussage darüber getroffen werden, dass durch den Faktor 6 ein clipping erst bei einer höheren Überbelichtung erreicht wird, als bei einem Faktor von 2. In Abbildung 21 können diese verglichen werden.

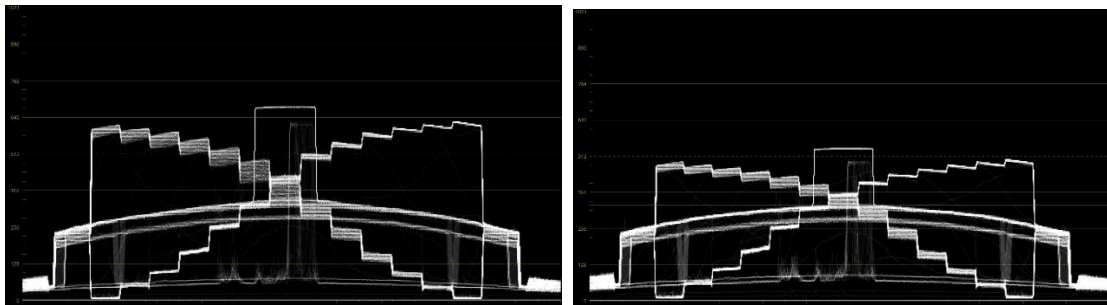


Abbildung 21: EPIC-W mit HDRx Faktor 2 (links) und 6 (rechts) bei +7 Stops
Quelle: Eigene Abbildung

Zu erkennen ist, dass die Codewerte der hellsten Graustufen bei einem HDRx-Faktor von 2, bei der gleichen Belichtung von +7 Stops höher liegen, als bei einem HDRx-Faktor von 6. Dies lässt darauf schließen, dass die maximalen Codewerte bei Ersterem bei einer geringeren Überbelichtung erreicht werden, als bei einem Faktor von 6. Wie bereits erwähnt, war aufgrund des verwendeten Testaufbaus und dem verwendeten Objektiv nur eine maximale Überbelichtung von +7 Stops möglich.

Durch die Verwendung des R3D-Formats kann nachträglich in REDCINE-X PRO der ISO-Wert angepasst werden. Diese Vorgehensweise kann nicht zum direkten Vergleich der Kameramodelle verwendet werden, da es sich um eine nachträgliche Verstärkung des Signals handelt. Dennoch kann dadurch eine genauere Vermutung formuliert werden, wann ein clipping bei den HDRx-Faktoren 2 und 6 eintreten wird. Der maximal erreichbare ISO-Wert innerhalb der Software ist 12800. Da die vorherigen Auswertungen

mit ISO 800 durchgeführt wurden, kann mit dem maximalen ISO-Wert eine Überbelichtung von +11 Stops erreicht werden. Wie in Abbildung 22 zu erkennen, ist mit dieser Methode bei einem HDRx-Faktor von 2 ein clipping bei ISO 6400 erreicht. Dieser ISO-Wert entspricht einer Überbelichtung von +10 Stops. Dies übertrifft die vorangegangene Vermutung, dass mit einem HDRx-Faktor von 2 ein clipping bei +9 Stops eintritt. Somit ergibt sich ein gesamter Dynamikumfang von 15 Blendenstufen. Wird ein HDRx-Faktor von 6 verwendet, kann selbst mit dieser Methode kein clipping erreicht werden.

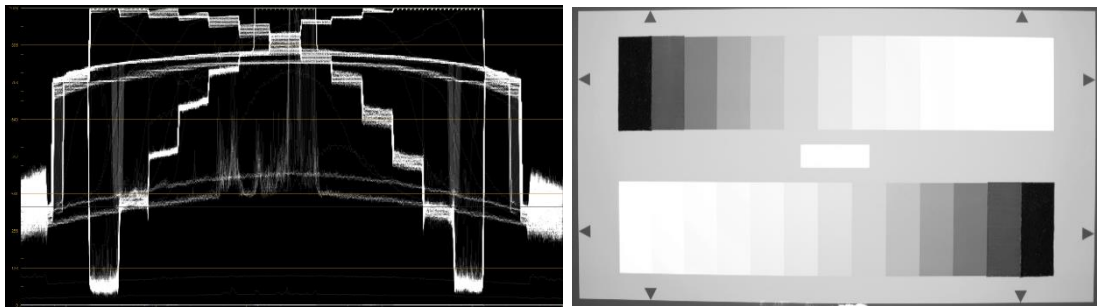


Abbildung 22: EPIC-W mit HDRx-Faktor 2, ISO 6400, +10 Stops Überbelichtung
Quelle: Eigene Abbildung

Im Folgenden werden die erweiterten HDRx-Einstellungen von REDCINE-X PRO verglichen. Für diesen Vergleich wird zunächst die maximale Überbelichtung bei +7 Stops verwendet. In Abbildung 23 sind die WFM-Bilder unter Verwendung der „Simple Blend“-Methode, sowie der „Magic Motion“-Methode für einen HDRx-Faktor von 6 gegenübergestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass aus der Verwendung von „Magic Motion“ ein erhöhter Codewert der hellsten Bildbereiche resultiert.

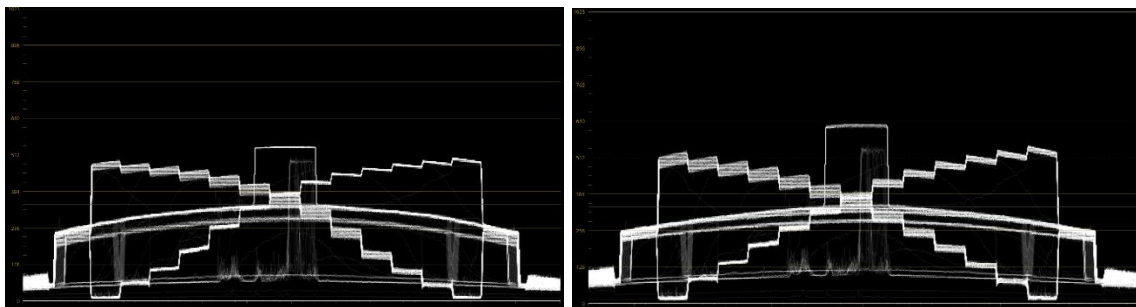


Abbildung 23: „Simple Blend“ (links) und „Magic Motion“ (rechts) bei HDRx (Faktor 6) und +7 Stops
Quelle: Eigene Abbildung

Daraus kann geschlossen werden, dass aus der „Magic Motion“-Methode eine geringere Dynamik in den hellen Bildbereichen resultiert. Unter Verwendung der „Magic Motion“-Methode bei einem HDRx-Faktor von 2, tritt ein interessanter Effekt ein. Wird diese Einstellung von REDCINE-X PRO mittels ProRes4444 an DaVinci Resolve übergeben, entsteht starkes banding ab einer Überbelichtung von 6 Stops. Um Kompressionsartefakte auszuschließen zu können, wurde ebenfalls diese Einstellung mittels TIFF-

Bilder übertragen. Werden diese in DaVinci Resolve korrigiert, tritt bei einer Überbelichtung von +6 Stops kein banding auf, dafür ist jedoch ein deutliches clipping zu erkennen. Dieser Effekt ist in Abbildung 24 dargestellt.

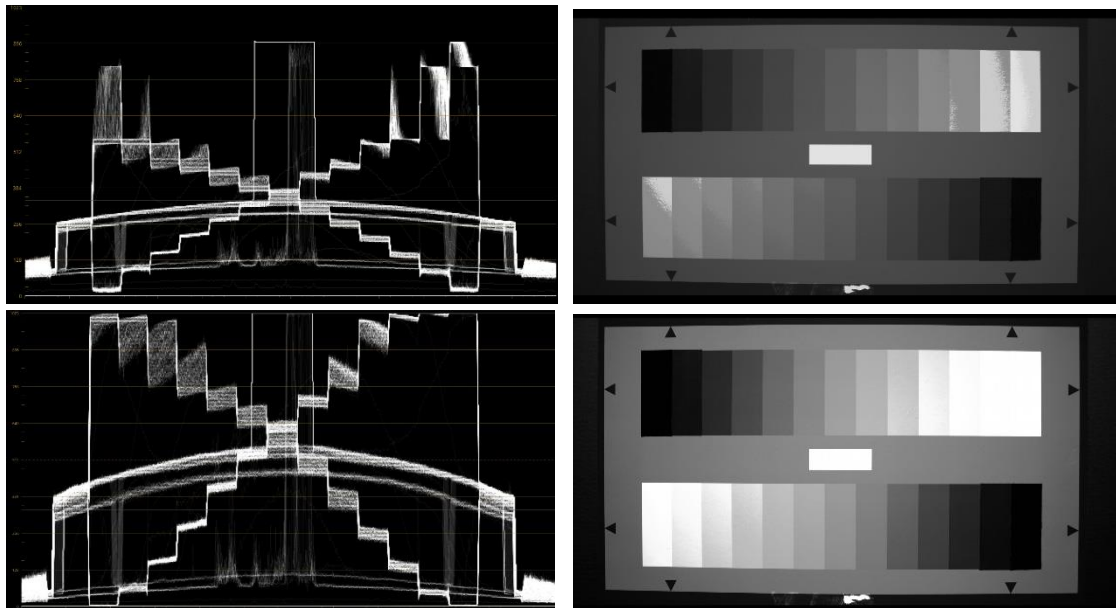


Abbildung 24: "Magic Motion" bei HDRx2, Übertragung an DaVinci via ProRes4444 (oben) und TIFF (unten)

Quelle: eigene Abbildung

Vergleich des gemessenen Dynamikumfangs aller Kameramodelle

In den Tests ist zusätzlich zu erkennen, dass für alle Kameramodelle ein geringerer Dynamikumfang gemessen wurde, als vom Hersteller angegeben. In Abbildung 25 ist dies grafisch dargestellt. Der blaue Teil der Balken zeigt den gemessenen Wert, der rote Teil die Differenz zum angegebenen Wert. Unter Verwendung von HDRx bei der RED EPIC-W ist dieser Teil grün eingefärbt, da dies nicht eindeutig nachgewiesen werden kann.

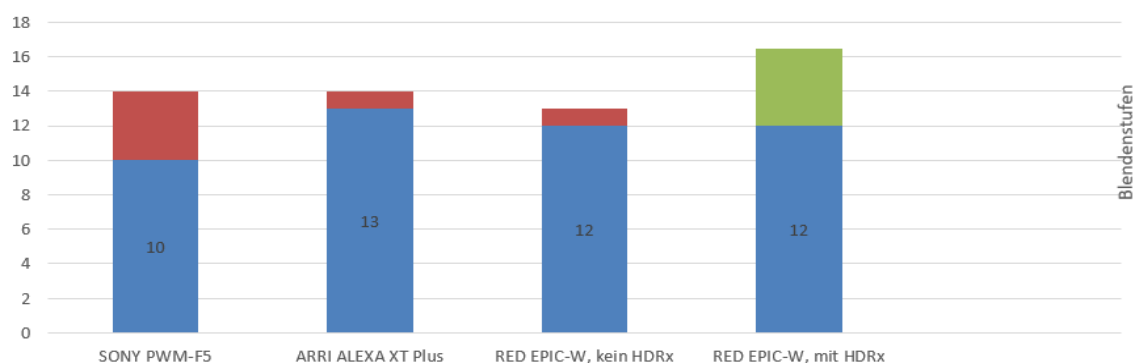


Abbildung 25: Gemessener und angegebener Dynamikumfang der Kameras

Quelle: Eigene Abbildung

So konnten für die ARRI ALEXA XT Plus, welche mit 14 Stops Dynamikumfang angegeben ist, lediglich 13 Stops gemessen werden. Trotz des angeblich gleichbleibenden Dynamikumfangs bei unterschiedlichen Belichtungsindizes, wurde für die Belichtungsreihe mit 160ASA nur noch ein Umfang von 12 Blenden festgestellt. Ebenfalls konnte die Angabe der RED EPIC-W nicht bestätigt werden. Diese wird mit 13 Blendenstufen, ohne Verwendung von HDRx, angegeben. Mit Hilfe des Testcharts konnten jedoch nur 12 dieser Stufen nachgewiesen werden. Die Angabe von 16,5+ Stops, konnte aufgrund der nicht ausreichenden Belichtungsreihe nicht überprüft werden. Vertraut man hier dem Hersteller und dessen Angabe, dass der HDRx-Faktor angibt um wie viele Stufen der Dynamikumfang gesteigert wird, könnte ein solcher Wert erst ab einem HDRx-Faktor von 4 erreicht werden. Besonders stark ist der Unterschied zwischen der Herstellerangabe und dem gemessenen Dynamikumfang bei der SONY PWM-F5. Hier beträgt dieser Unterschied ganze 4 Blendenstufen. Angegeben ist die SONY PWM-F5 mit 14 Blendenstufen, gemessen wurden jedoch lediglich 10. Damit verifiziert sich die erste These, dass die SONY PWM-F5 einen geringeren Dynamikumfang aufweist, als die ARRI ALEXA XT Plus und die RED EPIC-W.

6.3.2 Szenischer Test

Dynamik

Im szenischen Test werden die Kameras auf ihren Dynamikumfang mittels einer Szene mit hohem Szenenkontrast getestet. Zusätzlich soll die Bewegungsunschärfe, insbesondere hinsichtlich der HDRx-Technologie, untersucht werden. Der Verfasser geht davon aus, dass aufgrund der zwei zeitlich getrennten Belichtungen eine unnatürliche Bewegungsunschärfe entsteht. Diese wird Ghosting aufzeigen, weil durch die kürzere Belichtungszeit eine weitgehend scharfe Abbildung bewegter Objekte entstehen wird. Die scharfe Abbildung wird sich innerhalb der verwaschenen Abbildung der längeren Belichtungszeit befinden. Die ARRI ALEXA XT Plus sowie die SONY PWM-F5, werden lediglich eine verwaschene, weitaus natürlichere Bewegung aufweisen.

Betrachtet man den WFM der SONY PWM-F5 mit S-Log2 und S-Log3 bei dieser Szene, so fällt auf, dass bei S-Log2 die Highlights in den Reflexionen der Chromteile eine Belichtung von 100% erreichen (Abbildung 26). Dagegen werden diese Highlights bei S-Log3 begrenzt und erreichen somit einen niedrigeren Codewert. Dennoch clippen diese und werden daher in den hellsten Bereichen abgeschnitten. Des Weiteren ist das Bild insgesamt bei S-Log3 heller als bei S-Log2. S-Log2 wirkt insgesamt dunkler. Hierdurch lassen sich jedoch in den dunklen Bildpartien mehr Unterschiede erkennen, also die durchweg grauen Schatten von S-Log3.

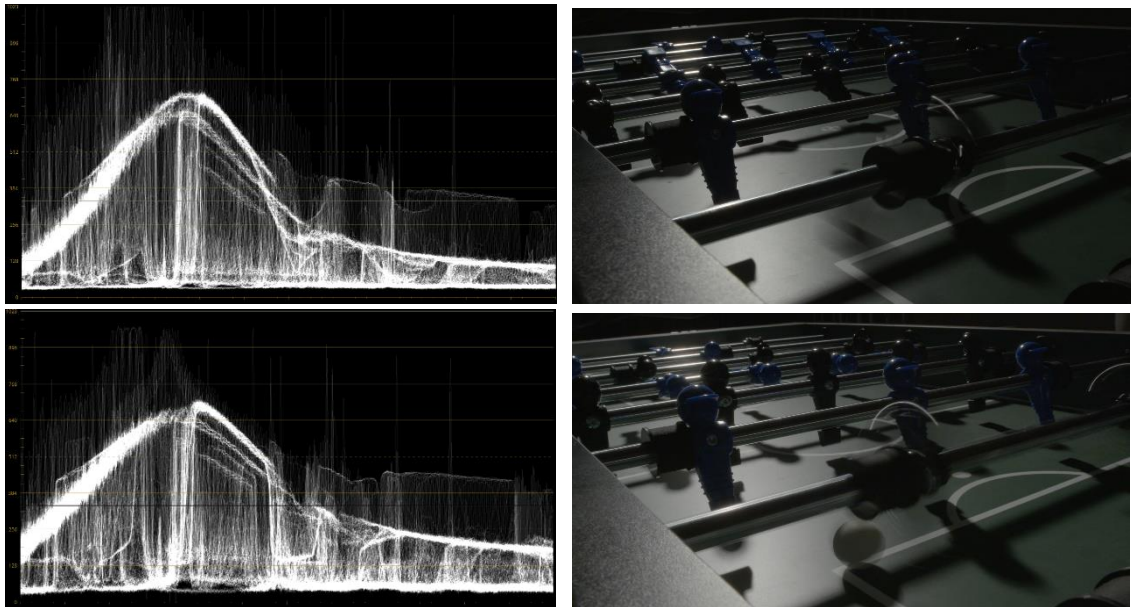


Abbildung 26: Szenischer Test der SONY PWM F5 mit S-Log2 (oben) und S-Log3 (unten)
Quelle: Eigene Abbildung

Wird die ALEXA XT Plus zum Vergleich hinzugezogen, kann zunächst der deutlich geringere Kontrast des Bildes wahrgenommen werden. Dies folgt aus den deutlich niedriger liegenden Mitten. Die Highlights der ALEXA erreichen das clipping nicht und werden nicht wie bei der SONY mit S-Log3 abgeschnitten. Somit sind diese, wie in Abbildung 27 erkennbar, in den hellsten Bildbereichen weiterhin differenzierbar.

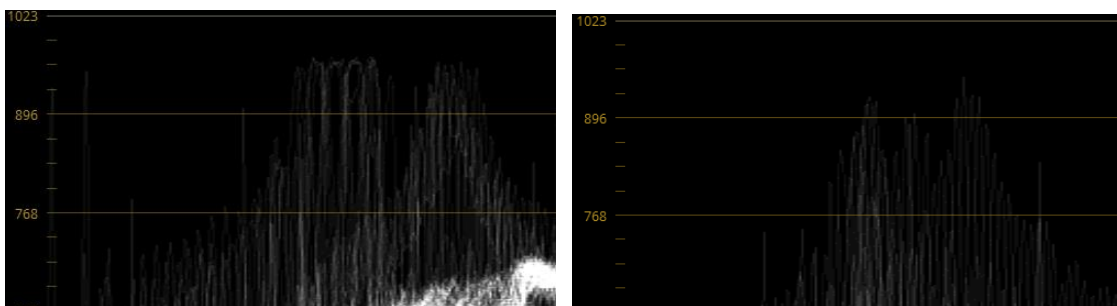


Abbildung 27: WFM der SONY PWM-F5 mit S-Log2 (links) und ARRI ALEXA (rechts), vergrößert auf die Highlights
Quelle: Eigene Abbildung

Wie bereits bei dem Test mittels des Testcharts festgestellt wurde, erreicht die RED mittels der unterschiedlichen HDRx-Faktoren, sowie der unterschiedlichen Kombinationsmethoden der A- und X-Frames, stark voneinander abweichende Ergebnisse. So weist ein Faktor von 6 eine höhere Dynamik auf, als ein Faktor von 2. Die Highlights erreichen bei Ersterem einen Codewert von ca. 768. Dagegen wird ein Codewert von über 896 bei einem Faktor 2 erreicht. Hieraus lässt sich ebenfalls schließen, dass die Verwendung

von höheren HDRx-Faktoren einen gesteigerten Dynamikumfang bewirken. Dieser übersteigt eindeutig den aufgezeichneten Szenenkontrast, da die Codewerte, besonders bei einem Faktor von 6, weit von einem clipping entfernt sind (Abbildung 28).

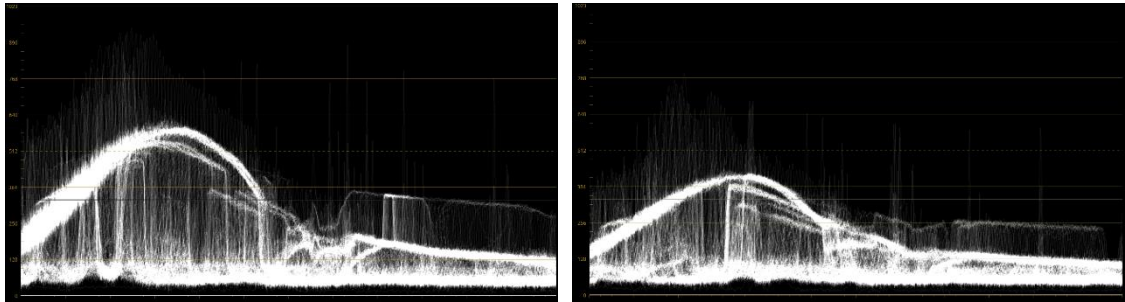


Abbildung 28: Szenischer Test der RED EPIC-W mit HDRx-Faktor 2 (links) und 6 (rechts)
Quelle: Eigene Abbildung

Bewegungsunschärfe

Die Kameras SONY PWM-F5 und ARRI ALEXA XT Plus erreichen, wie erwartet, für 25 FPS und $\frac{1}{50}$ Sekunde Belichtungszeit, eine typische Bewegungsunschärfe. Diese ist bei einer solch schnellen Bewegung, stark verschwommen und zeigt keine klaren Umrisse des bewegten Objekts. In Abbildung 29 ist dies deutlich zu erkennen.

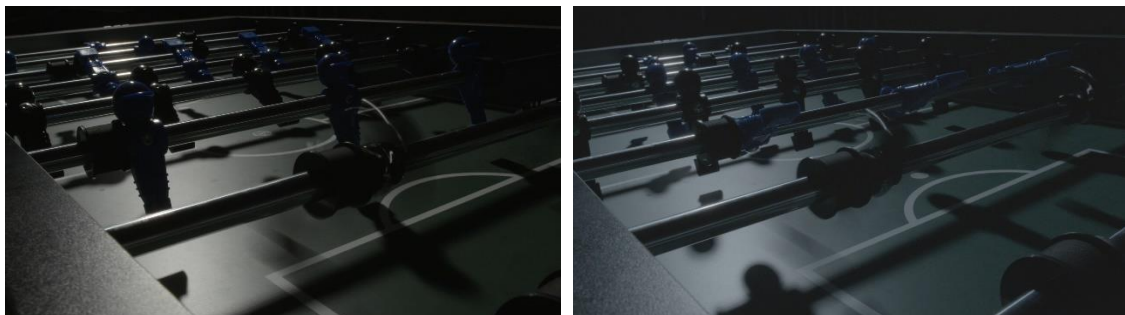
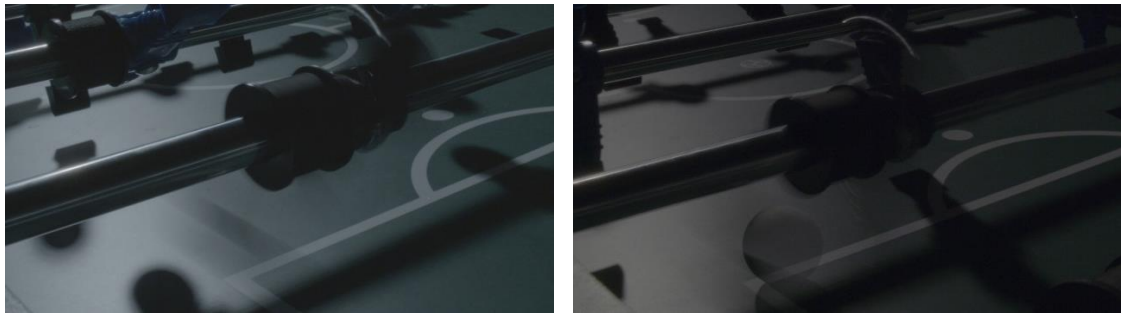


Abbildung 29: Bewegungsunschärfe der SONY PWM-F5 und ARRI ALEXA XT Plus
Quelle: Eigene Abbildung

Zieht man nun die Aufnahmen der RED EPIC-W als Vergleich hinzu, kann ein deutlicher Unterschied in der Bewegungsunschärfe erkannt werden. So ist neben der typischen verschwommenen Bewegung, zusätzlich noch eine scharfe Abbildung des Balls zu erkennen. Dieser ist jedoch durchsichtig und gibt zu Teilen den Blick auf das sich dahinter befindliche Spielfeld frei. Des Weiteren erscheint dieser nicht gleichmäßig hell und weist somit unterschiedliche Durchlässigkeiten auf. Dieser Effekt ist auf die zwei unterschiedlichen Belichtungszeiten zurückzuführen. Die längere Belichtung des A-Frames bewirkt die typisch verschwommene Bewegungsunschärfe, ähnlich wie sie bei der ARRI ALEXA und SONY PWM-F5 erkennbar ist. Da das X-Frame eine deutlich kürzere Belichtungszeit aufweist, werden hiermit Bewegungen deutlich schärfer abgebildet. Abbildung 30

zeigt einen direkten Vergleich der ALEXA und der RED EPIC-W mit HDRx-Faktor 6. Der Bildausschnitt ist auf die Bewegung vergrößert.



*Abbildung 30: Bewegungsunschärfe: Alexa (links) und EPIC-W, HDRx-Faktor 6 (rechts)
Quelle: Eigene Abbildung*

Mit diesen Ergebnissen des szenischen Tests kann die These, dass die Verwendung von HDRx bei RED zu Ghosting-Effekten führt, verifiziert werden.

7 Schlussbetrachtung

Abschließend kann gesagt werden, dass es viele verschiedene Möglichkeiten gibt, den Dynamikumfang einer digitalen Filmkamera über die üblichen 5 Stops des Rec.709 Standards zu steigern. Jede dieser Möglichkeiten bringt jedoch gewisse Vor- und Nachteile mit sich. Diese äußern sich weitestgehend darin, wie effektiv sie bezüglich des Dynamikumfangs arbeiten.

So kann beispielsweise die Verwendung einer OETF schon gute Ergebnisse erzielen. Eine Gamma-Kurve wird grundsätzlich nicht zur Erweiterung des Dynamikumfangs verwendet. Trotzdem lässt sich durch die Einstellungsmöglichkeiten wie Knie-Funktion, oder Änderung des Gamma-Wertes der Dynamikumfang bedingt verbessern. Speziell durch die Knie-Funktion, also die Abflachung der Übertragungsfunktion in den hellen Bildbereichen, kann besonders dort eine minimale Steigerung der Dynamik erreicht werden. Deutlich besser zur Steigerung des Dynamikumfangs mittels einer OETF, ist die Verwendung von Log-Kurven. Jedoch bringen diese den Nachteil mit sich, dass eine Farbbearbeitung in der Postproduktion unumgänglich ist. Zusätzlich kann durch unterschiedliche Log-Kurven der Dynamikbereich speziell angepasst werden. Ein gutes Beispiel hierfür sind die Kurven S-Log2 und S-Log3 des Herstellers SONY. So sind diese Kurven nicht Vor- oder Nachgänger, sondern vielmehr zusätzliche Auswahlmöglichkeiten. Durch die Verwendung von S-Log2 kann beispielsweise eine bessere Dynamik in dunklen Bildbereichen erzielt werden. S-Log3 hingegen verbessert die Dynamik in hellen Bildbereichen.

Besonders effektiv sind die Ansätze der Hersteller RED und ARRI. Mit Hilfe dieser lässt sich der Dynamikumfang einer Kamera im Vergleich zur simplen Verwendung von Log-Kurven nochmals deutlich steigern. Die Kombination von Log-Kurve und einer dieser Ansätze erweitert den Dynamikumfang um 5 (Dual-Gain von ARRI), oder sogar bis zu 8 (HDRx von RED) Stops im Vergleich zum Rec.709 Standard.

Da ein höherer Dynamikumfang zu deutlich mehr Vorteilen führt, als die Steigerung der Auflösung, kann davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach hohen Dynamikumfangen bereits bei der Herstellung von Inhalten weiter steigen wird. Dies ist ebenfalls daran zu erkennen, dass die Kamerahersteller nun ihre Kameras nicht mehr nur noch mit höheren Auflösungen, sondern auch mit der Bezeichnung HDR anpreisen. Vorteile, wie ein verbesserter Schärfeeindruck, mehr Farben und auch eine bessere Tiefenwirkung sind vor allem für die Streaming-Plattformen ein Grund ihren Kunden HDR-Inhalte anbieten zu wollen. Besonders die Voraussetzungen dieser Plattformen, hinsichtlich des Dynamikumfangs für ihre selbstproduzierten Inhalte, werden die Kamerahersteller zu immer höher steigenden Dynamikumfangen und damit auch verbesserten Technologien führen.

Literaturverzeichnis

Schmidt, Ulrich (2013): Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehetechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, DI, 3D, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg

Hoefflinger, Bernd (Hrsg.) (2007): High-Dynamic-Range (HDR) Vision, Berlin Heidelberg

Webers, Johannes (2011): Die Technik der audiovisuellen Medien. Film - Audio - Video, Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg

Erhardt, Angelika (2008): Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen, Systeme und Anwendungen, Wiesbaden

Bloch, Christian (2012): The HDRI handbook 2.0. High dynamic range imaging for photographers and CG artists, Santa Barbara, CA

Brown, Blain (2015): The filmmaker's guide to digital imaging. For cinematographers, digital imaging technicians, and camera assistants, Burlington, MA

Banterle, Francesc u.a. (2011): Advanced high dynamic range imaging. Theory and practice, Boca Raton, FL

Pynton, Charles (1998): The Rehabilitation of Gamma, in: B.E., and T.N. Pappas (Hrsg.) (1998): Human Vision and Electronic Imaging III, Proceedings of SPIE/IS&T Conference 3299, Bellingham, Wash. S. 232-249

Shaw, Steve (2013): Introduction to the Digital Intermediate Process. in: Svanberg, Lasse (Hrsg.) (2013): The EDCF guide to digital cinema production, Burlington, MA., o.A.

Adams, Art (2009): The Not-So-Technical Guide to S-Log and Log Gamma Curves, PRO VIDEO COALITION, 03. Februar 2009, URL: https://www.provideocoalition.com/the_not_so_technical_guide_to_s_log_and_log_gamma_curves/ (Zugriff am: 06.02.2018)

Kaufman, Debra (2017): HIGHER GROUND. A Producer's Guide To High Dynamic Range (HDR), Produced by, 9. Juni 2017, <http://www.producersguild.org/blog-post/1618066/278208/HIGHER-GROUND--A-Producer-s-Guide-To-High-Dynamic-Range-HDR> (Zugriff am 05.01.2018)

Shipsides, Andy (2013): HDTV Standards, HDVideoPro, 1. Oktober 2013, URL: <https://www.hdvideopro.com/columns/help-desk/hdtv-standards/2/> (Zugriff am: 05.02.2018)

ARRI (Hrsg.): The best for HDR since 2010, o.A., URL: <http://www.arri.com/news/news/the-best-for-hdr-since-2010/> (Zugriff am: 08.01.2018)

ARRI (Hrsg.): ARRI Imaging Technologie. Best Overall Image Quality, o.A., URL: http://www.arri.com/camera/alex/technology/arri_imaging_technology/best_overall_image_quality/ (Zugriff am: 09.01.2018)

ARRI (Hrsg.): ARRI Imaging Technologie. Alexas Sensor, o.A., URL: http://www.arri.com/camera/alexa/technology/arri_imaging_technology/alexa_sensor/ (Zugriff am: 09.01.2018)

ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Technische Daten, o.A., URL: http://www.arri.com/de/camera/alexa/kameras/kamera_details/alexa-xt-plus/subsection/technical_data/ (Zugriff am: 16.01.2018)

ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Merkmale, o.A., URL: http://www.arri.com/de/camera/alexa/kameras/kamera_details/alexa-xt-plus/subsection/xt_plus_features/ (Zugriff am: 16.01.2018)

ARRI (Hrsg.): ALEXA XT Plus. Übersicht o.A., URL: http://www.arri.com/de/camera/alexa/kameras/kamera_details/alexa-xt-plus/subsection/overview/ (Zugriff am: 16.01.2018)

ARRI (Hrsg.): ALEXA LogC Curve in VFX, o.A., URL: http://www.centron.sk/Storage/Document/Product/3453-2012-08-02_Alexa_LogC_Curve-Usage_in_VFX.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

ARRI RENTAL Group (Hrsg.): 65mm Reborn. Technische Daten, o.A., URL: http://arri-rentalgroup.com/alexa65/index_de.html (Zugriff am: 05.02.2018)

Blackmagic Design (Hrsg.): DAVINCI RESOLVE 14. PROGRESSIVE FARBKORREKTUR, o.A., URL: <https://www.blackmagicdesign.com/de/products/davinciresolve/color> (Zugriff am: 21.01.2018)

Image Engineering (Hrsg.): TE223 A. data sheet, o.A., URL: https://www.image-engineering.de/content/products/charts/te223/downloads/TE223_A_data_sheet.pdf (Zugriff am: 16.01.2018)

RED (Hrsg.): RED101. HIGH DYNAMIC RANGE VIDEO WITH HDRX, o.A., URL: <http://www.red.com/learn/red-101/hdrx-high-dynamic-range-video> (Zugriff am: 09.01.2018)

RED (Hrsg.): RED EPIC-W, o.A., URL: <http://www.red.com/products/epicw-8k#tech-specs> (Zugriff am: 16.01.2018)

RED (Hrsg.): UNDERSTANDING SENSOR CROP FACTORS, o.A., URL: <http://www.red.com/learn/red-101/sensor-crop-factors> (Zugriff am: 05.02.2018)

RED (Hrsg.): WHITE PAPER ON REDWIDEGAMUTRGB AND LOG3G10, o.A., URL: <https://www.red.com/downloads/585358faf01b3062ab0009f8> (Zugriff am: 05.02.2018)

RED (Hrsg.): IPP2: IMAGE PIPELINE STAGES, o.A., URL: <https://www.red.com/downloads/58de8ef92325b41b45000543> (Zugriff am: 05.02.2018)

SONY (Hrsg.): PMW-F5. Genial vielseitig, o.A., URL: <https://www.sony.de/pro/product/broadcast-products-camcorders-digital-motion-picture-camera/pmw-f5/overview/> (Zugriff am: 16.01.2018)

SONY (Hrsg.): S-Log2 Technical Paper, o.A., URL: https://pro.sony.com/bbsccms/assets/files/micro/dmpc/training/S-Log2_Technical_PaperV1_0.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

SONY (Hrsg.): Technical Summary for S-Gamut3.Cine/S-Log3 and S-Gamut3/S-Log3, o.A., URL: https://pro.sony.com/bbsccms/assets/files/micro/dmpc/training/TechnicalSummary_for_S-Gamut3Cine_S-Gamut3_S-Log3_V1_01.pdf (Zugriff am: 05.02.2018)

ZEISS (Hrsg.): ARRI / ZEISS Ultra Prime Lenses. Highest performance over the entire focusing range, o.A., URL: <https://www.zeiss.de/camera-lenses/cinematografie/products/ultra-prime-lenses.html> (Zugriff am: 07.02.2018)


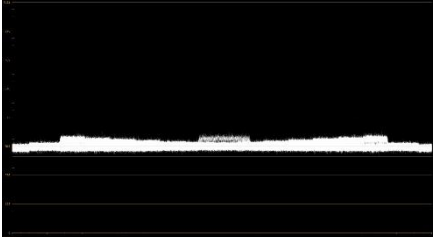

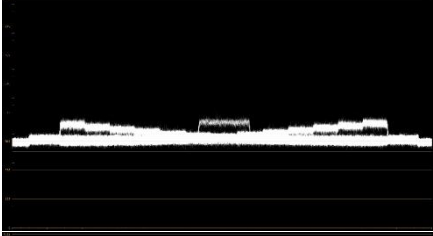

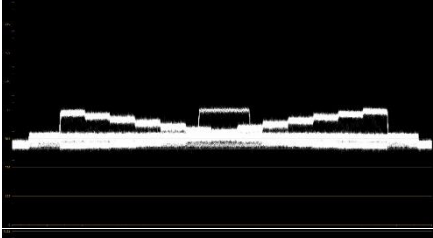

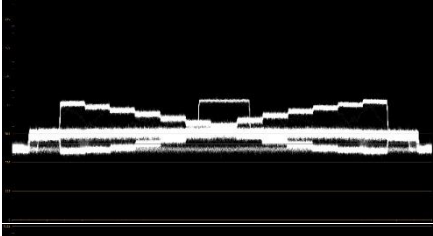
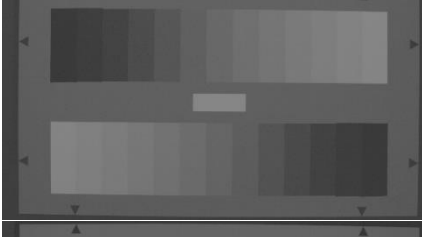
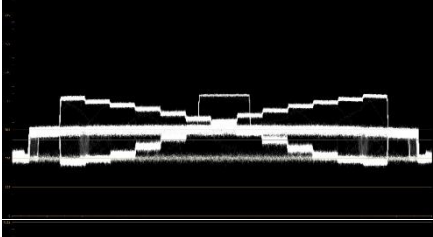

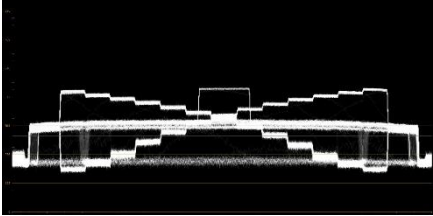
ZEISS (Hrsg.): ZEISS Compact Prime CP.2 Lenses. Compact and Lightweight lenses with Interchangeable Mount System, o.A., URL: <https://www.zeiss.de/camera-lenses/cinematografie/products/compact-prime-cp2-lenses.html> (Zugriff am: 17.01.2018)

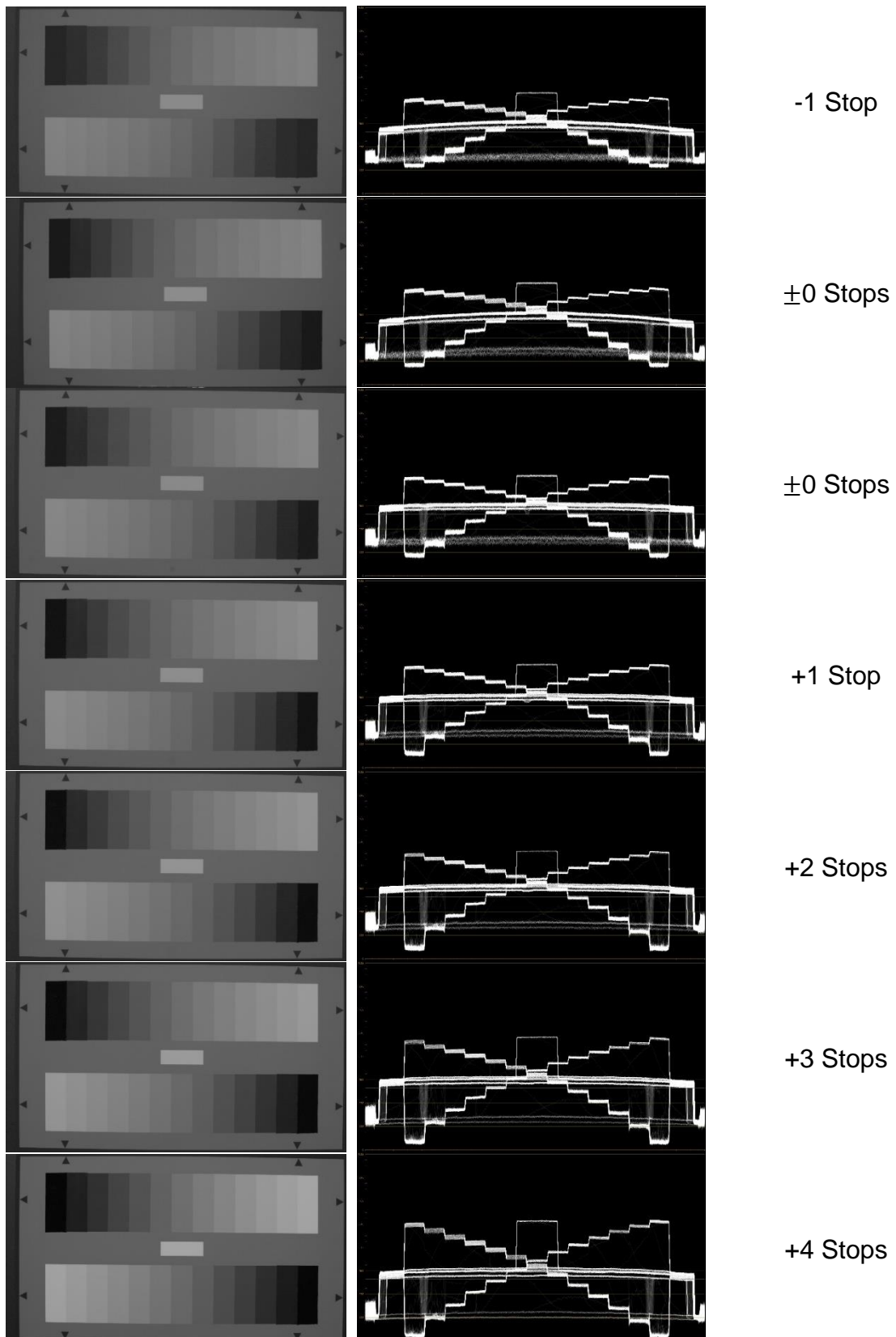
Shipman-Müller, Marc (2016): Video, veröff. bei Arri.com am 22.12.2016, URL: <http://www.arri.com/de/videos/videos/hdr-overview-arri-workshop-in-paris-december-2016/> (Zugriff am: 04.01.2018)

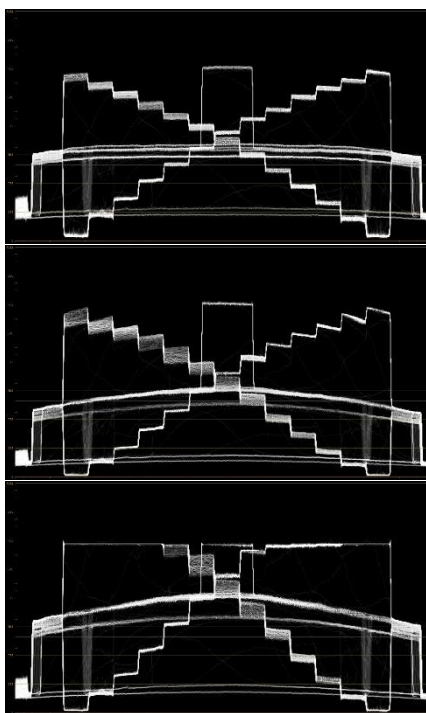
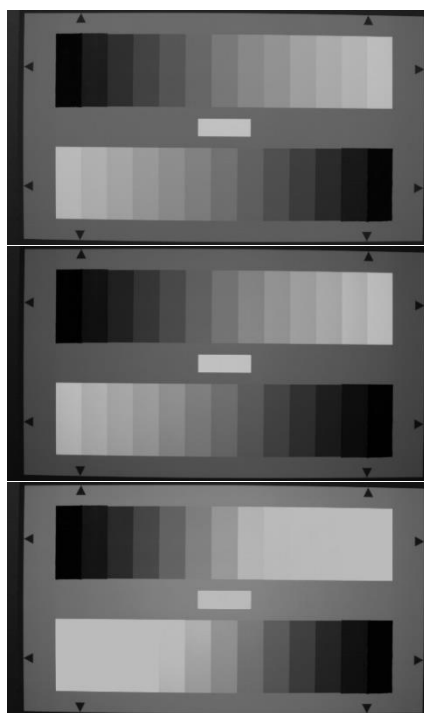
RED (Hrsg.) (2016): Video, veröff. bei Red.com am 15.12.2016, URL: <http://www.red.com/learn/red-tech/red-tech-iso-settings> (Zugriff am: 16.01.2018)

Anlagen

ARRI ALEXA XT PLUS
ASA800

Still	WFM	Stops
		-7 Stops
		-6 Stops
		-5 Stops
		-4 Stops
		-3 Stops
		-2 Stops



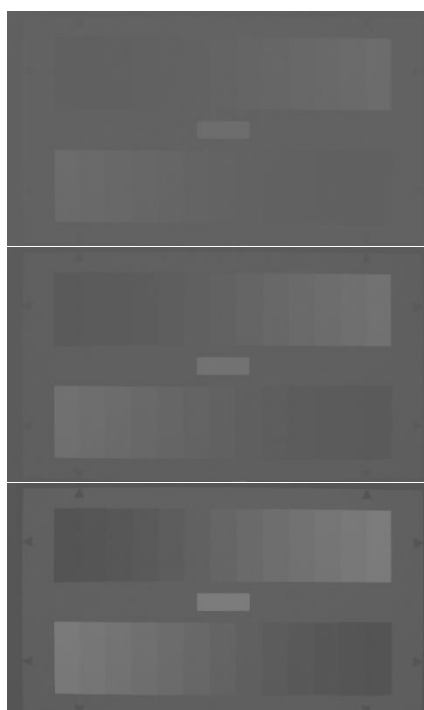


+5 Stops

+6 Stops

+7 Stops

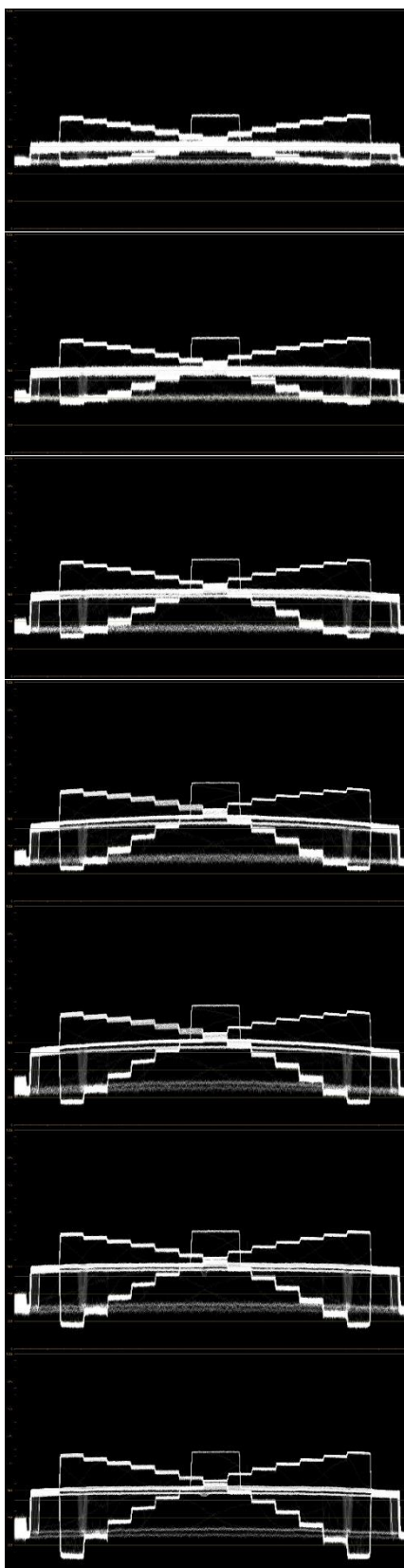
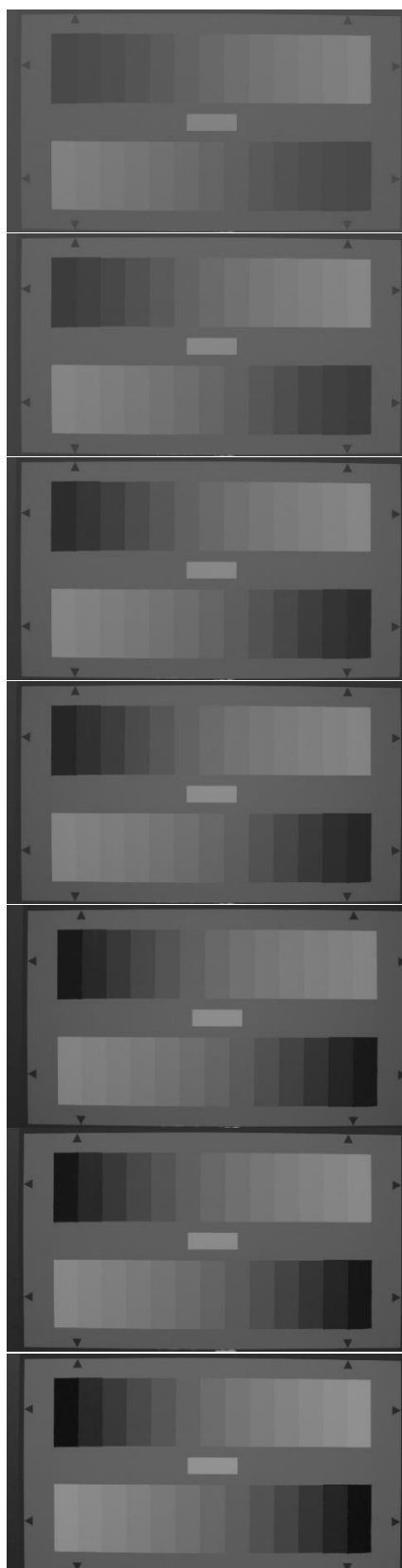
ARRI ALEXA XT PLUS
ASA160

Still**WFM****Stops**

-7 Stops

-6 Stops

-5 Stops



-4 Stops

-3 Stops

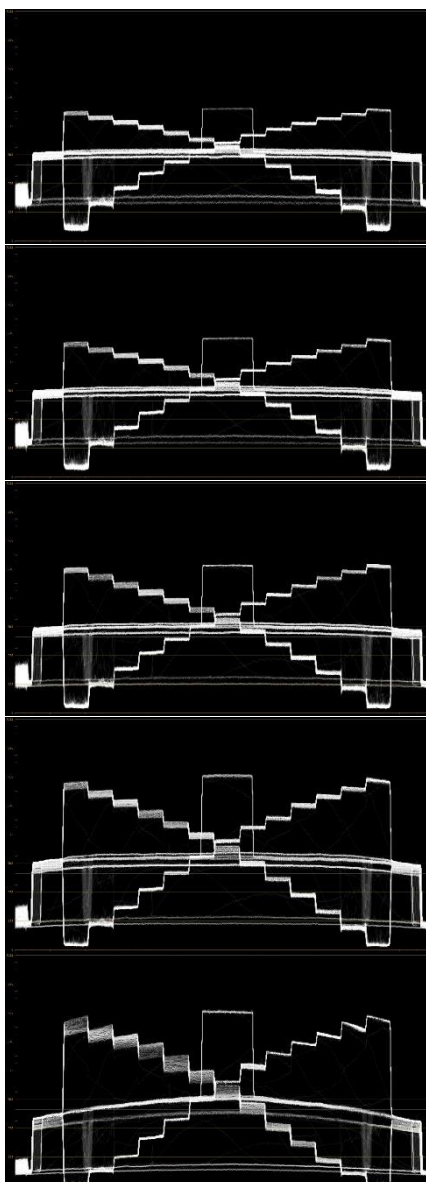
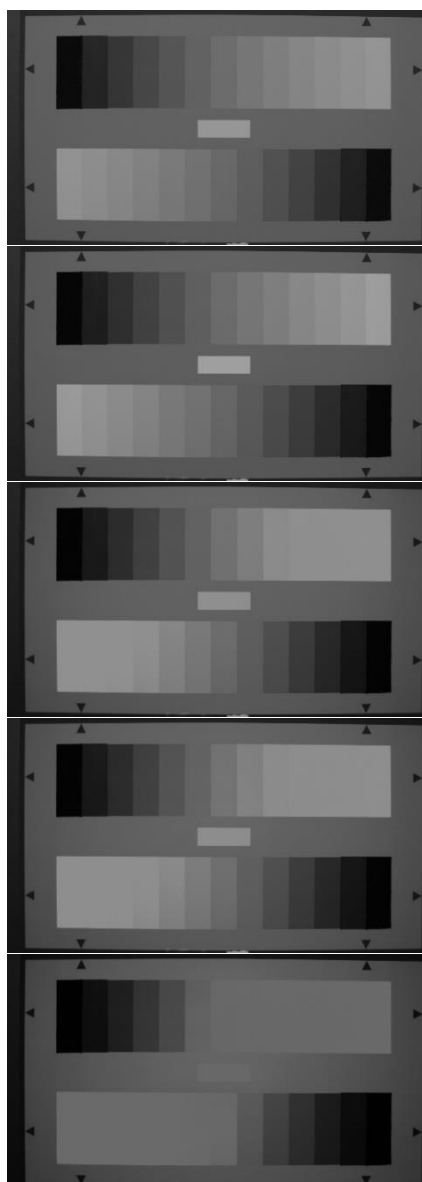
-2 Stops

-1 Stop

± 0 Stops

± 0 Stops
ARRI UP 20mm T8

+1 Stop
ARRI UP 20mm T5,6



+2 Stops
ARRI UP 20mm T4

+3 Stops
ARRI UP 20mm T2,9

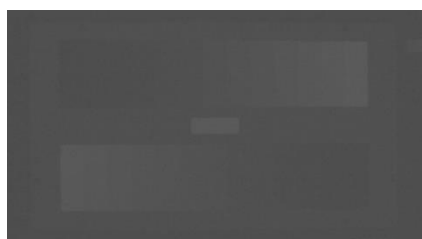
+4 Stops
ARRI UP 20mm T2

+5 Stops
ARRI UP 20mm T1,9

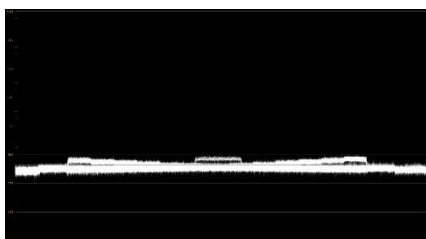
+6 Stops
ARRI UP 20mm T1,9
& $\frac{1}{25} S$

SONY PWM-F5
S-Log2

Still

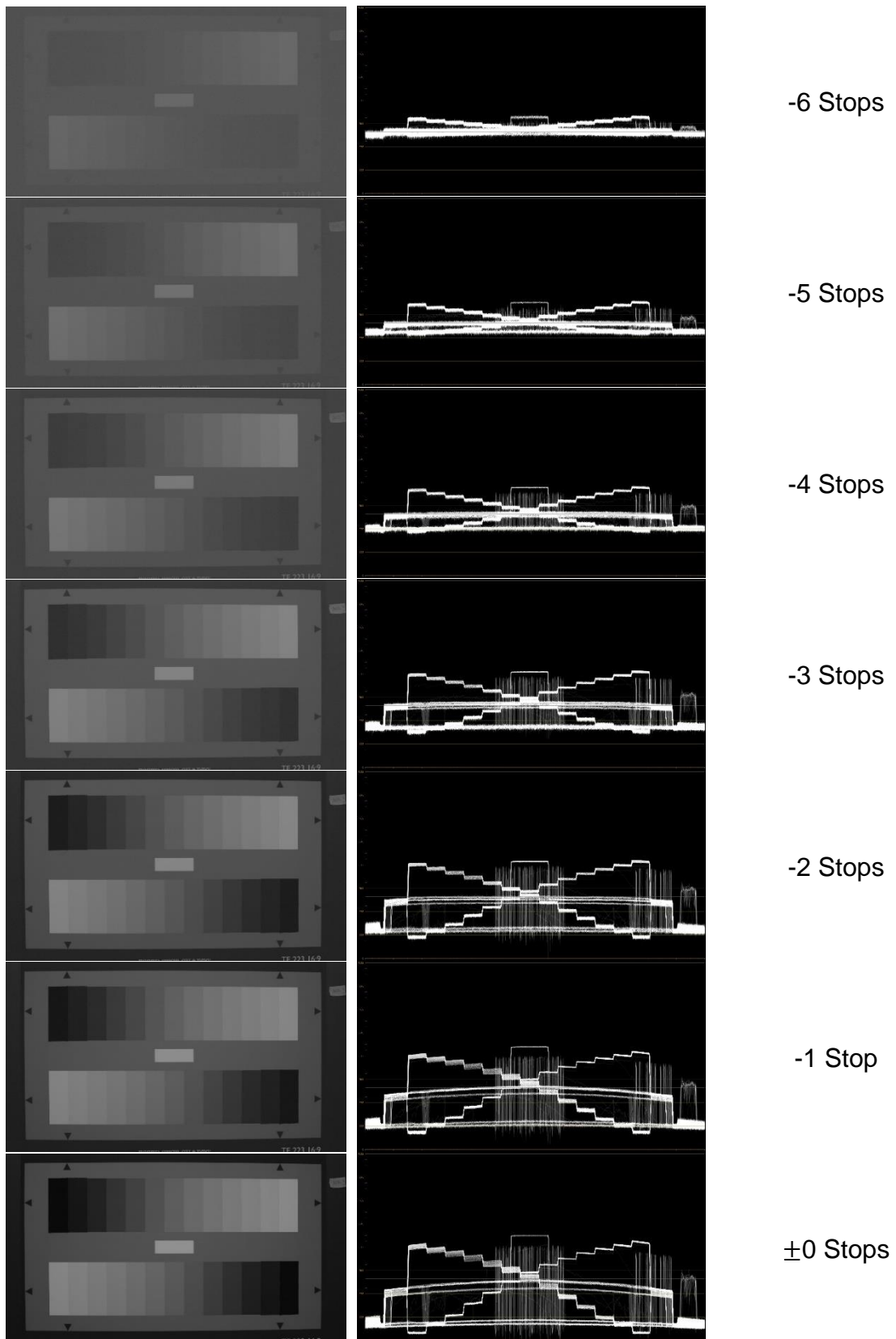


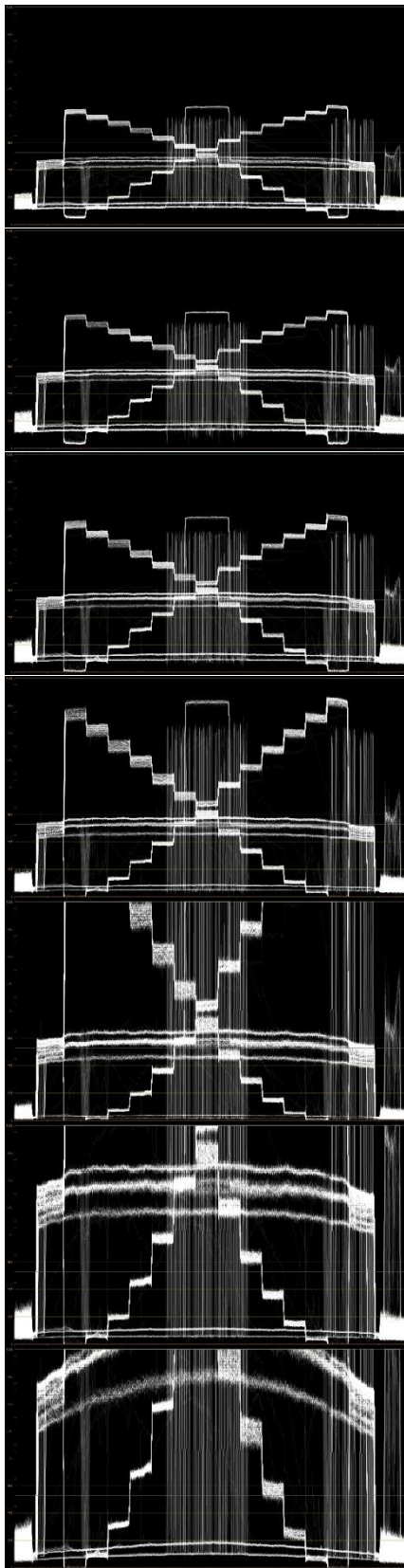
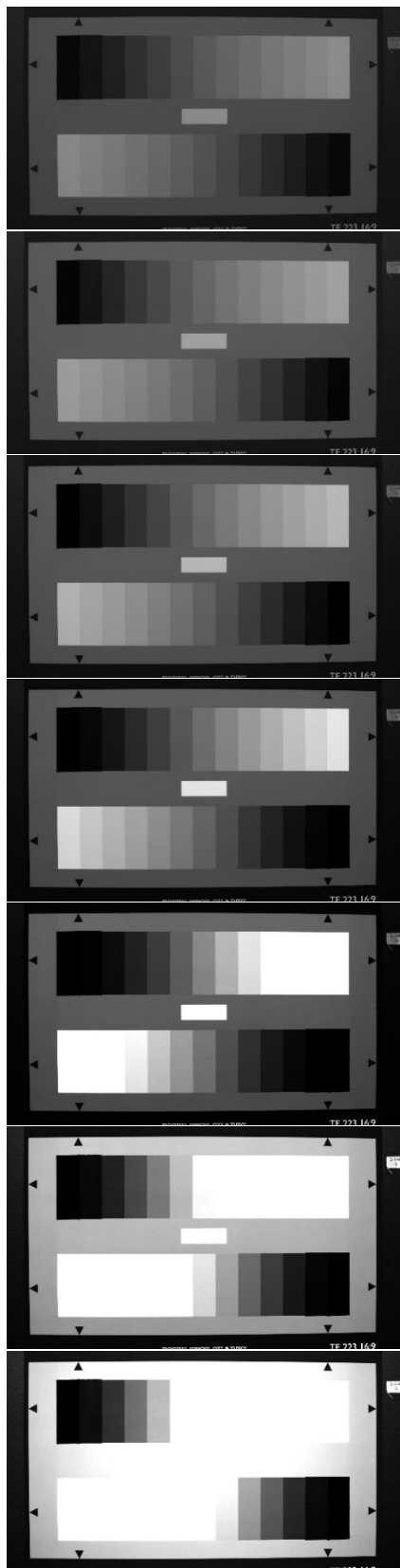
WFM



Stops

-7 Stops





± 0 Stops

+1 Stop

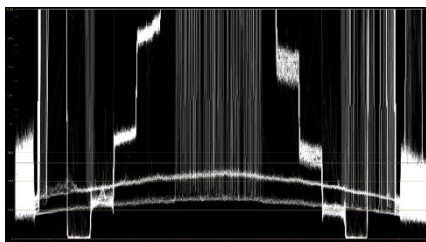
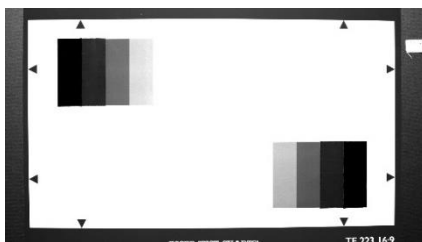
+2 Stops

+3 Stops

+4 Stops

+5 Stops

+6 Stops



+7 Stops

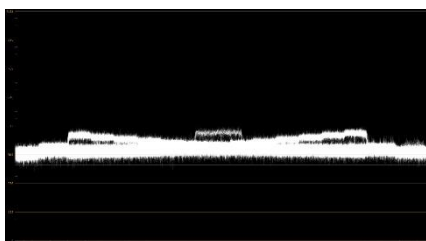
SONY PWM-F5

S-Log3

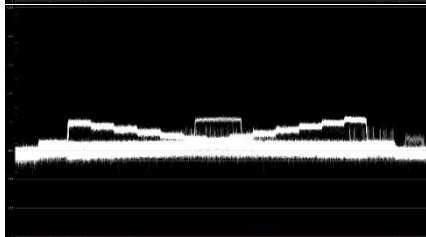
Still

WFM

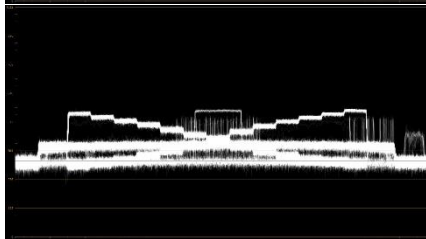
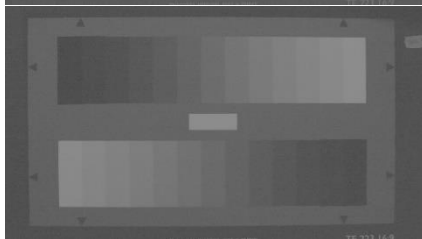
Stops



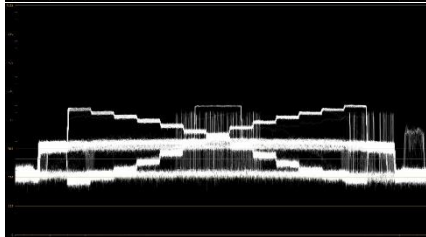
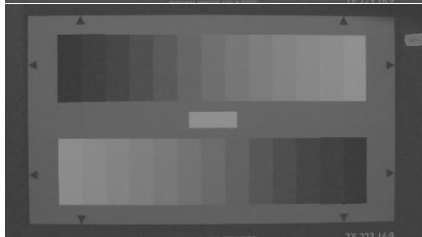
-7 Stops



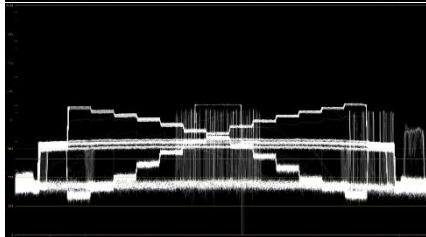
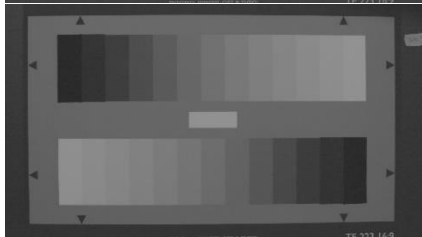
-6 Stops



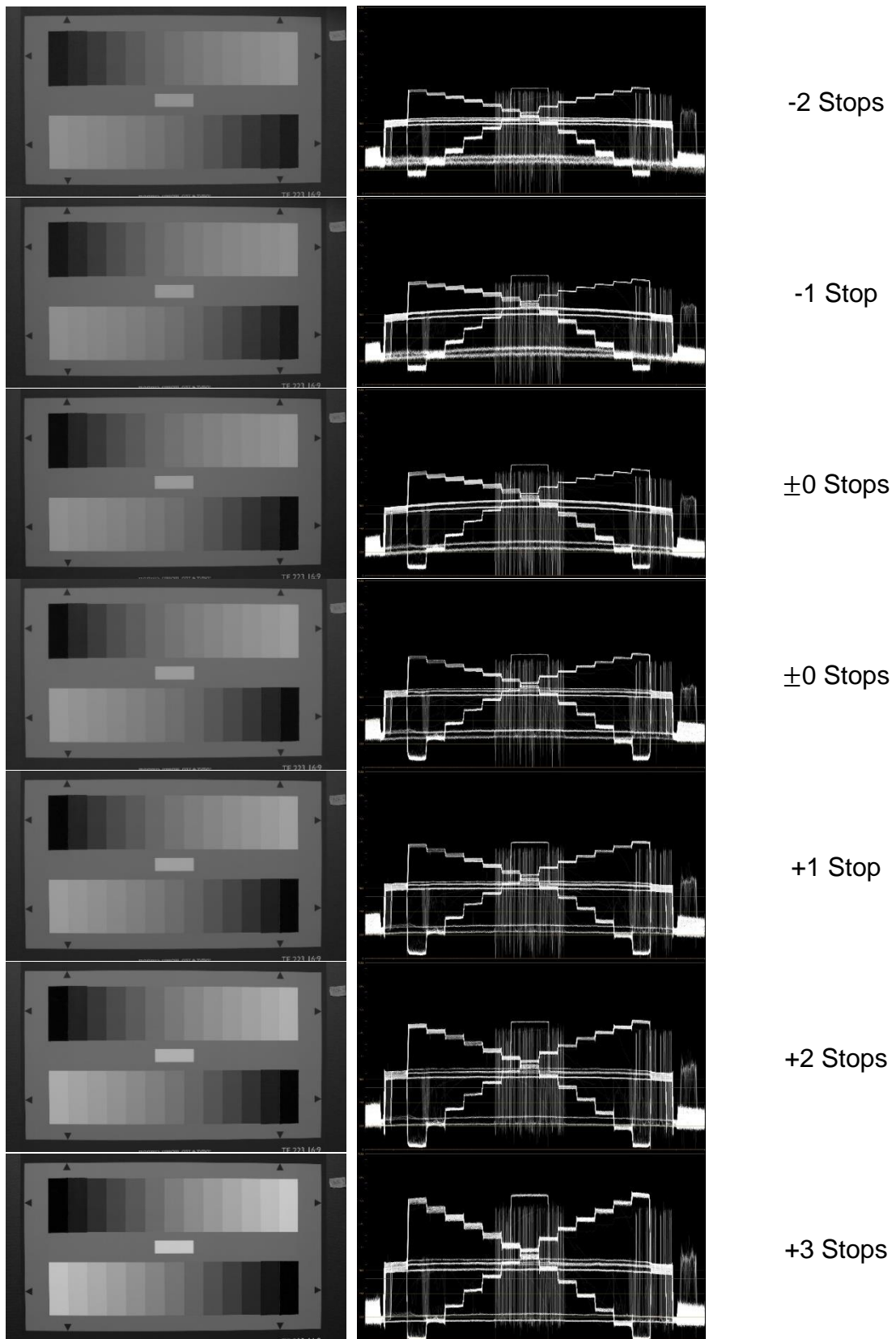
-5 Stops

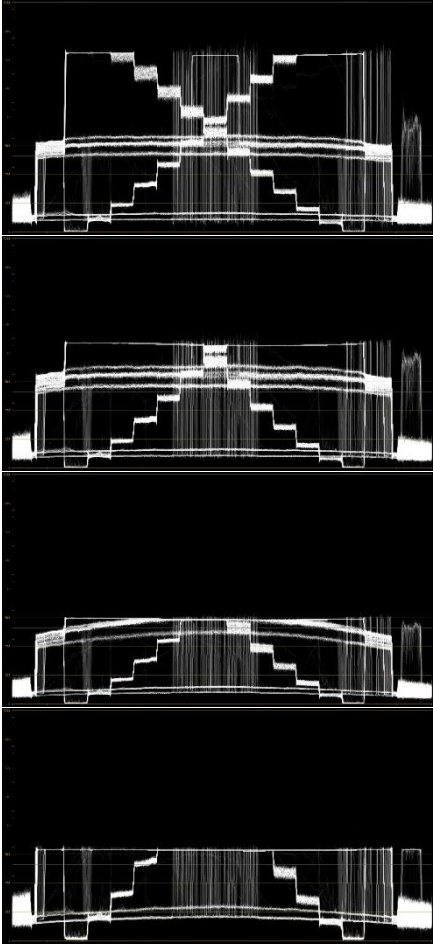
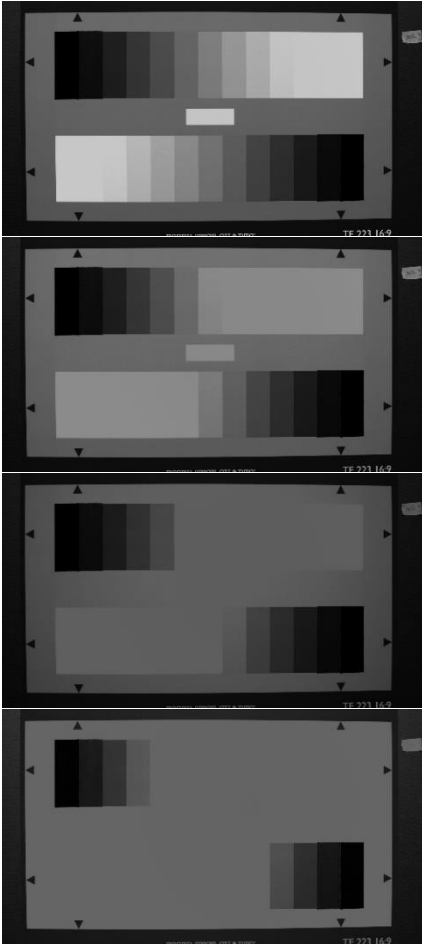


-4 Stops



-3 Stops





+4 Stops

+5 Stops

+6 Stops

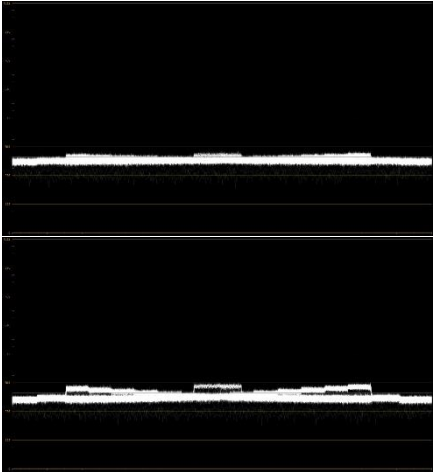
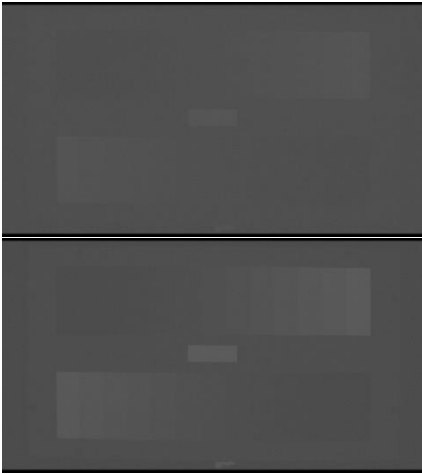
+7 Stops

RED EPIC-W
Helium 8K
A-Frame

Still

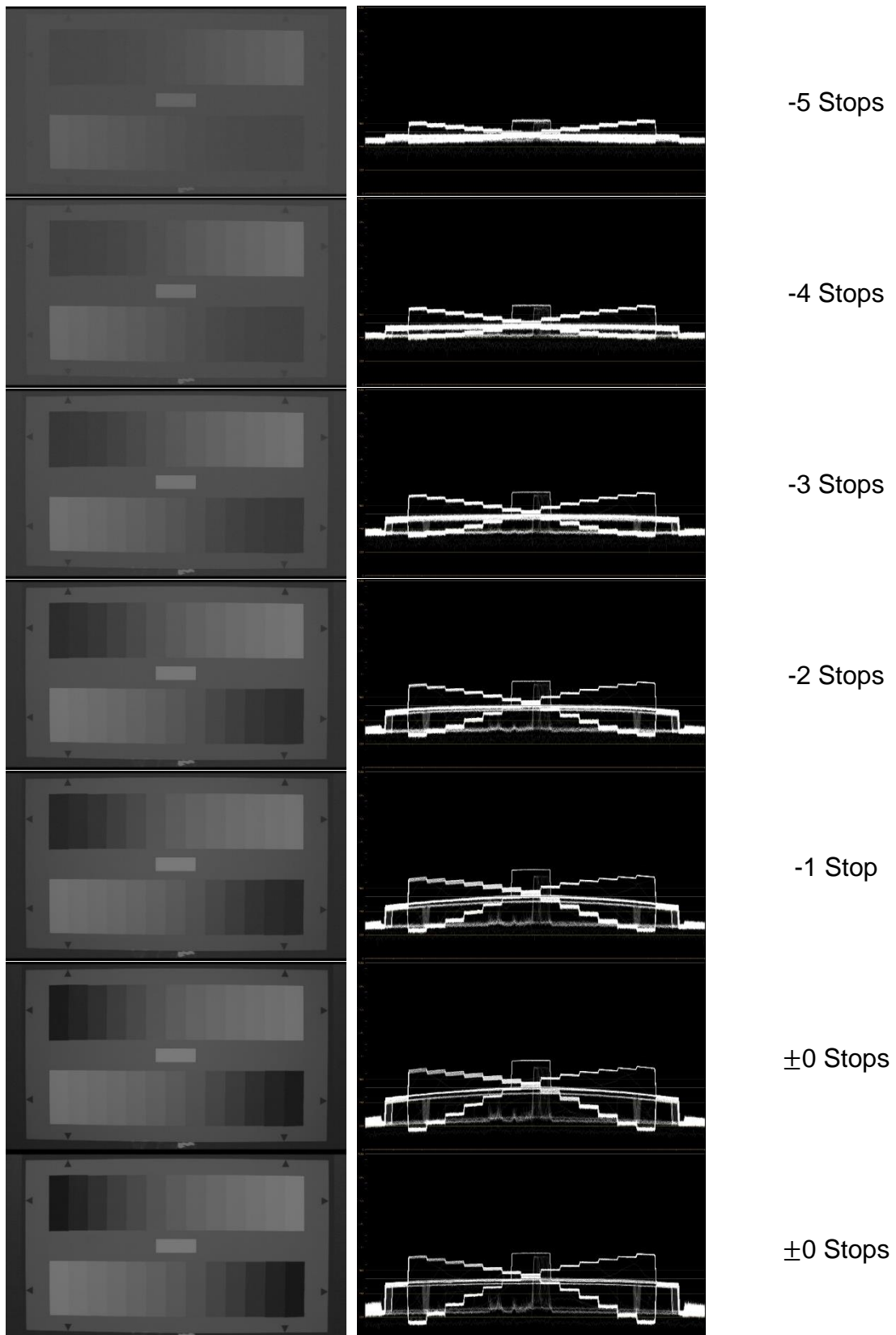
WFM

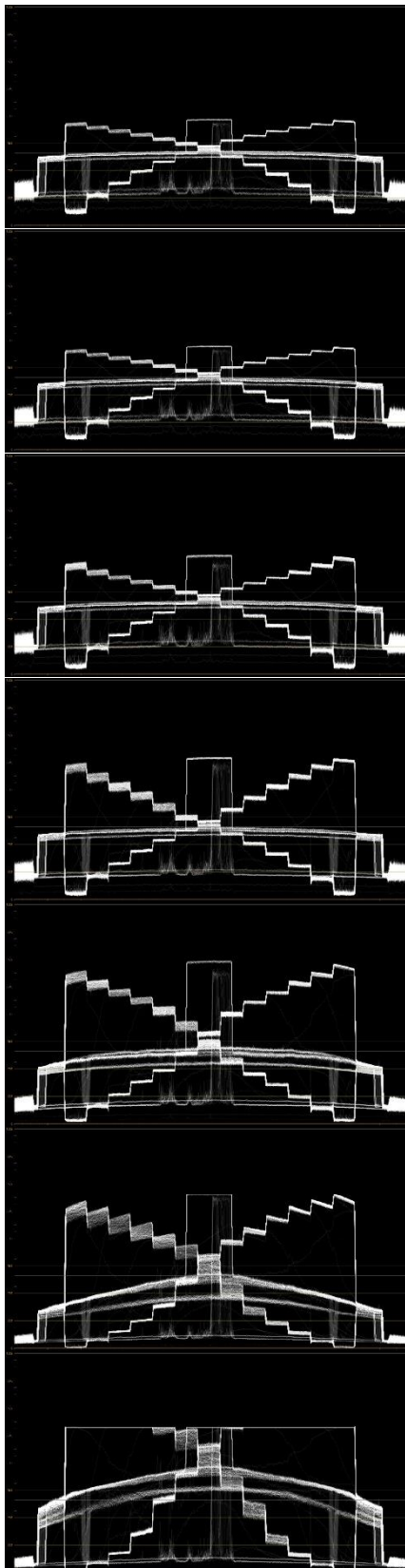
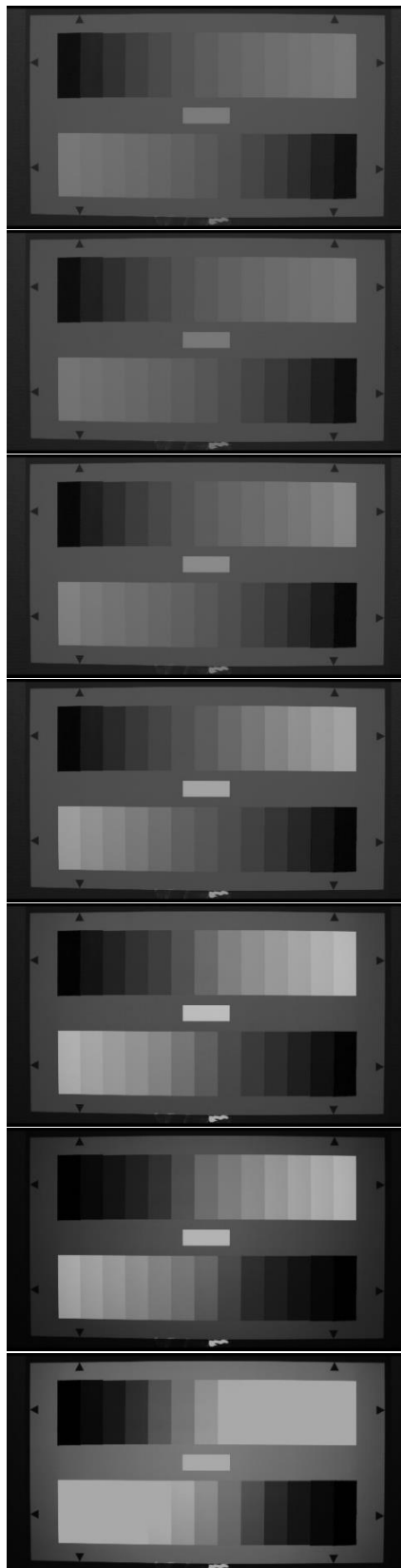
Stops



-7 Stops

-6 Stops





+1 Stop

+2 Stops

+3 Stops

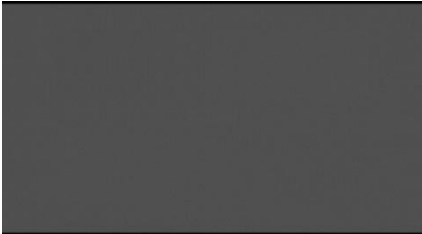
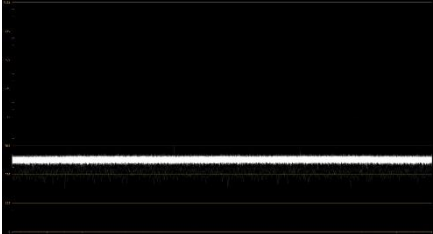

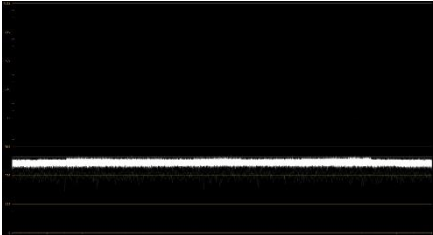

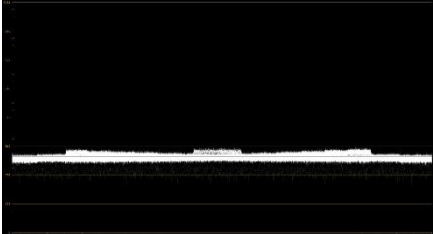

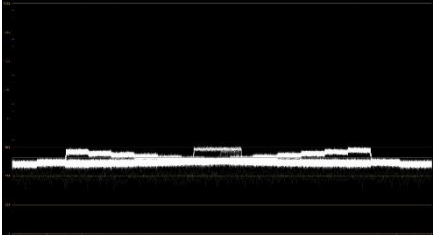

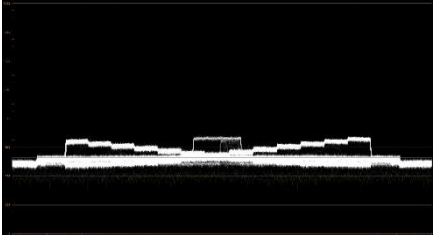

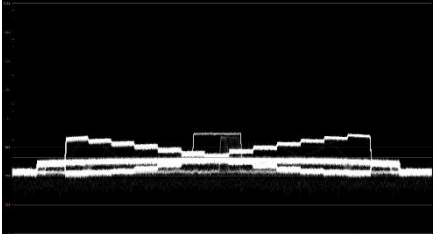
+4 Stops

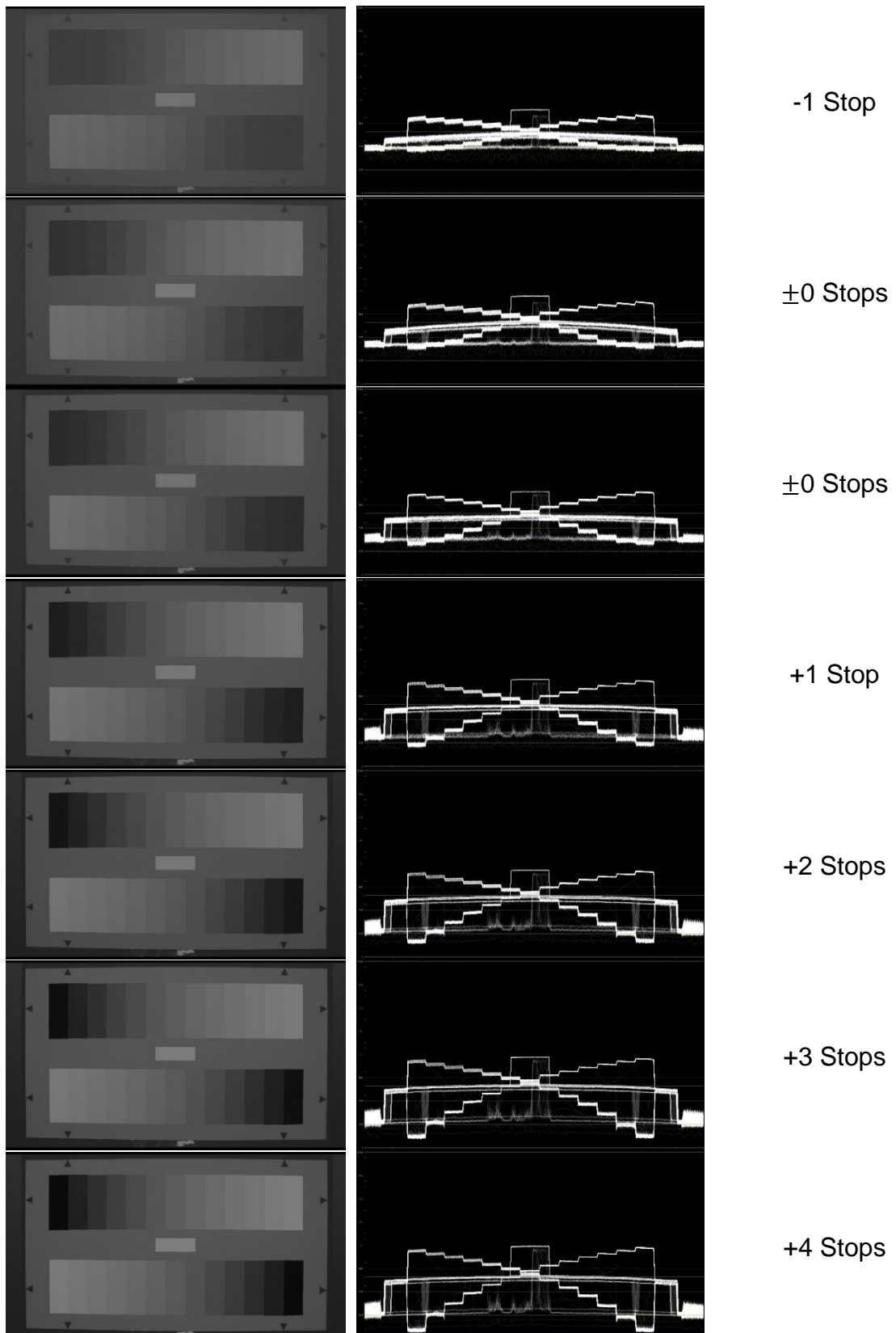
+5 Stops

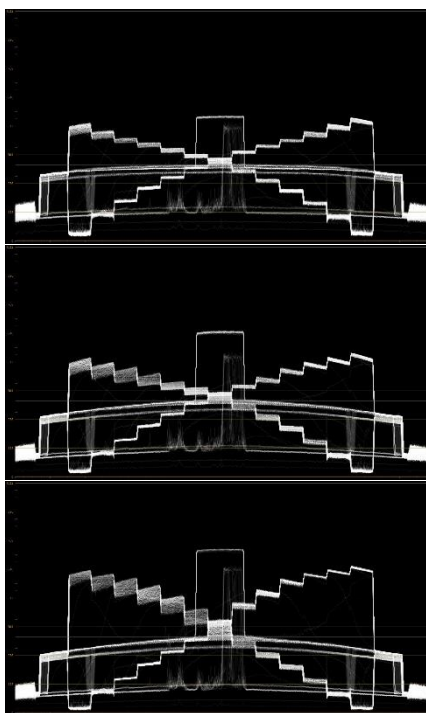
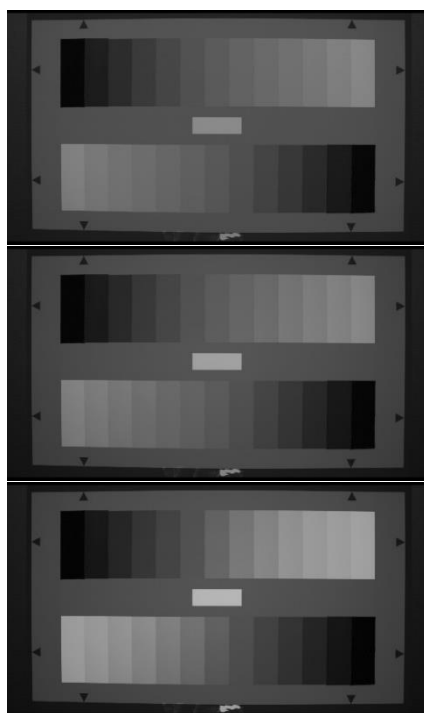
+6 Stops

+7 Stops

RED EPIC-W
Helium 8K
HDRx2 X-Frame

Still	WFM	Stops
		-7 Stops
		-6 Stops
		-5 Stops
		-4 Stops
		-3 Stops
		-2 Stops





+5 Stops

+6 Stops

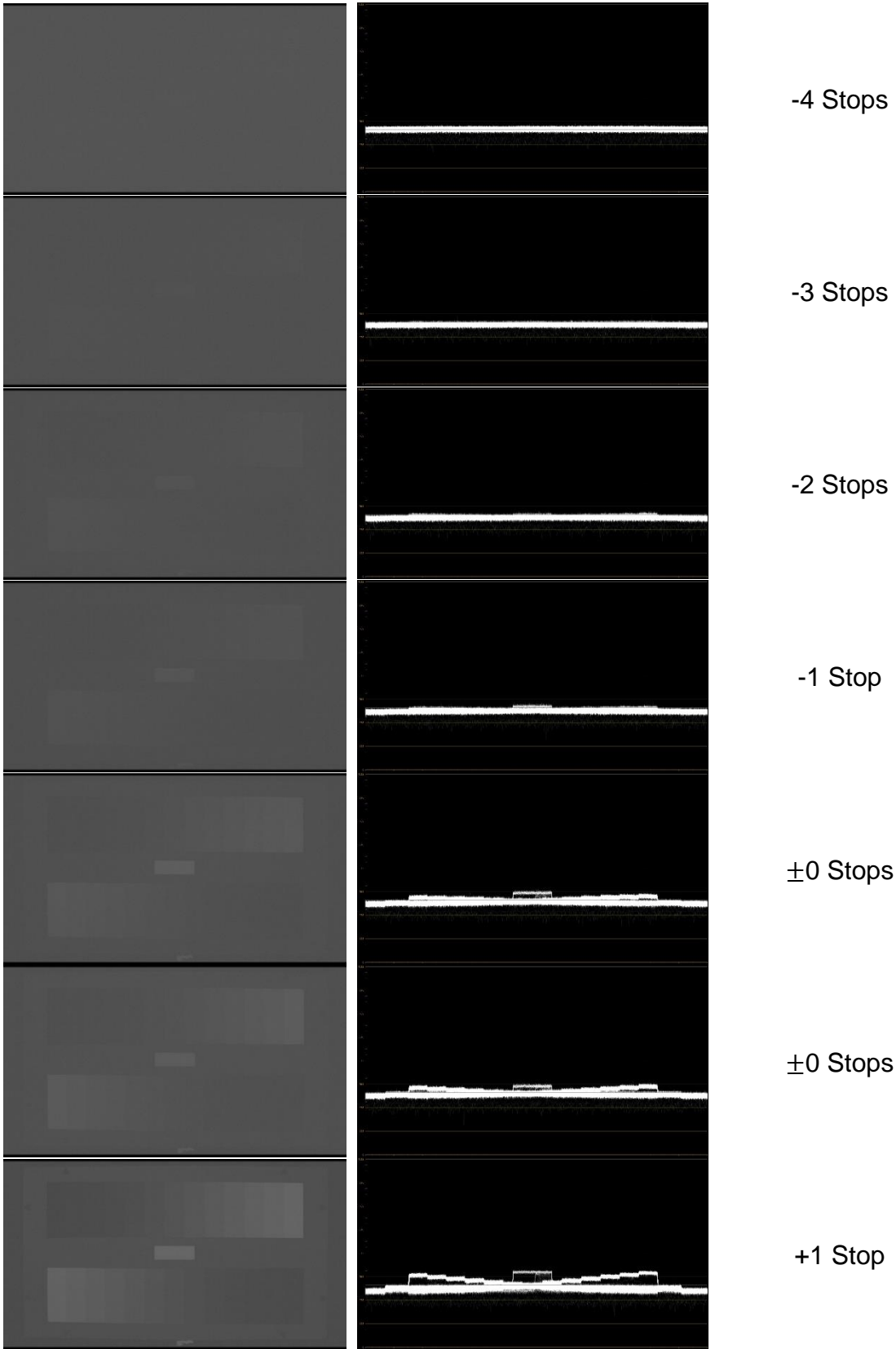
+7 Stops

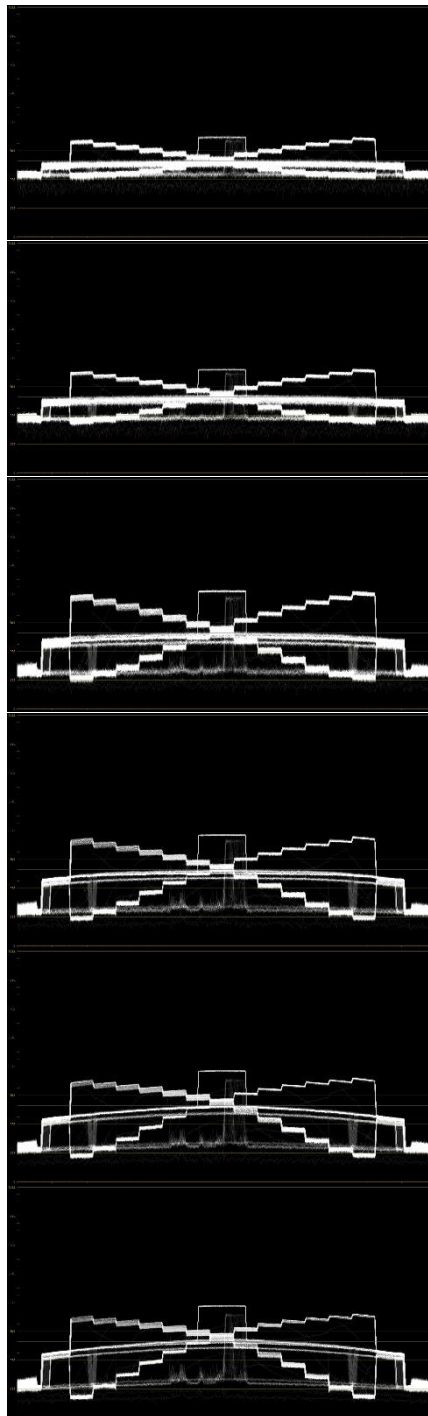
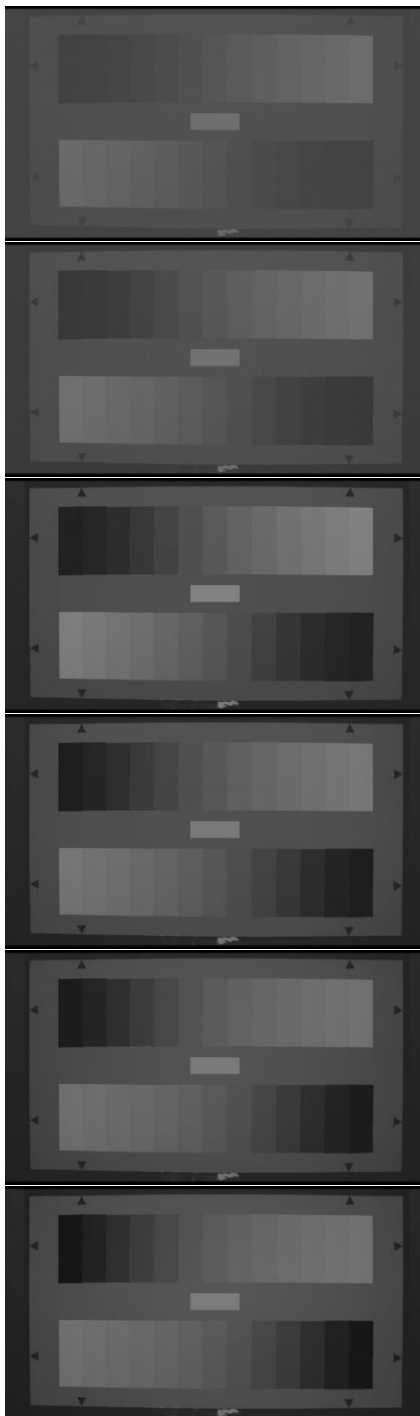
RED EPIC-W*Helium 8K**HDRx6 X-Frame***Still****WFM****Stops**

-7 Stops

-6 Stops

-5 Stops





+2 Stops

+3 Stops


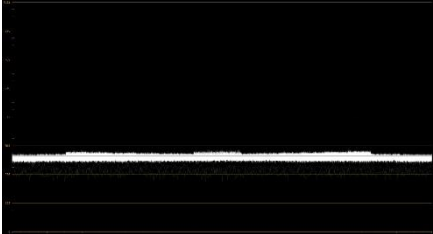

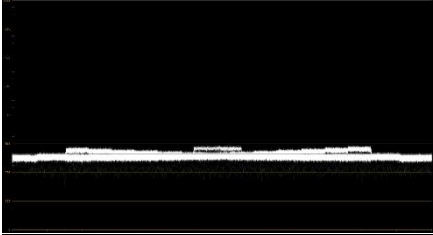
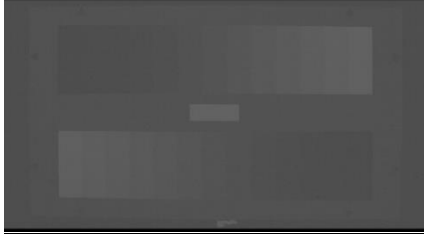
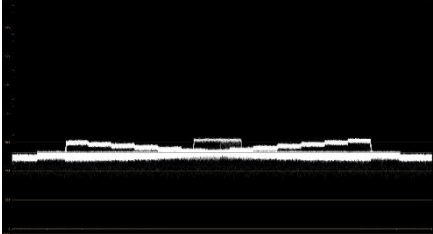

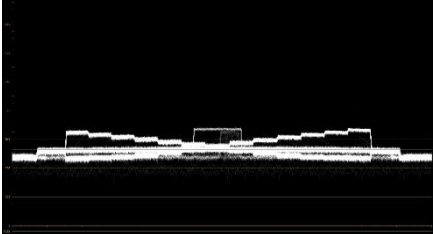
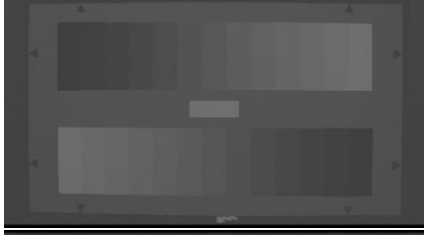
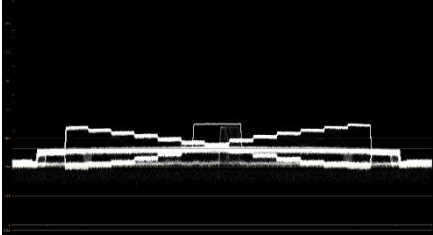

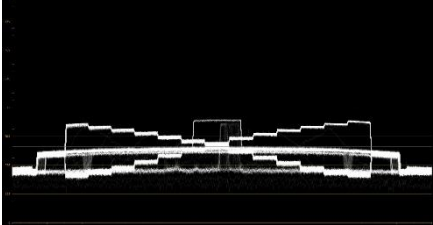
+4 Stops

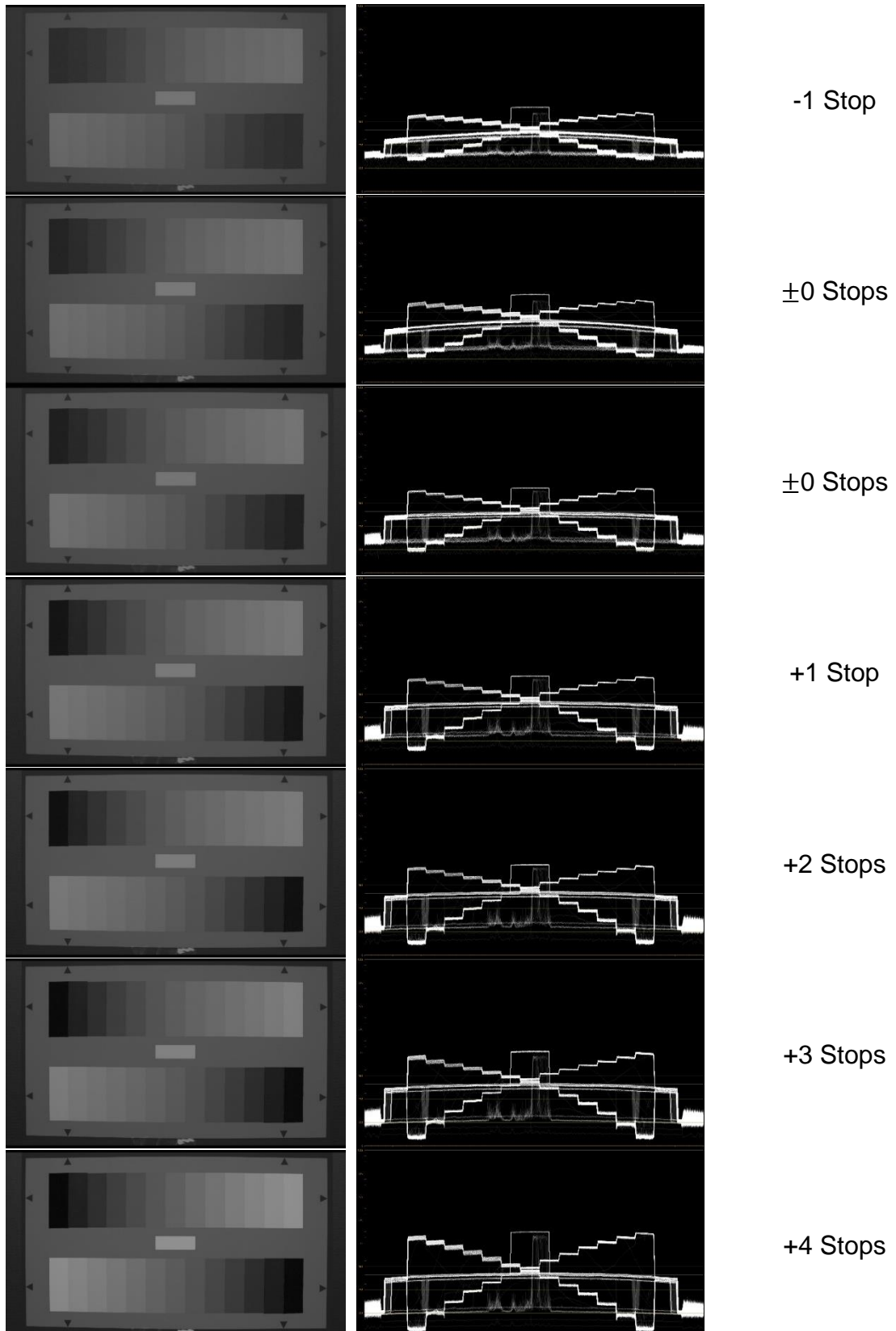
+5 Stops

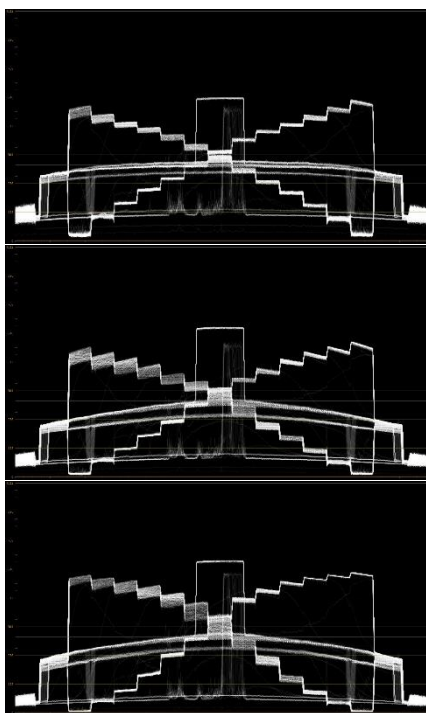
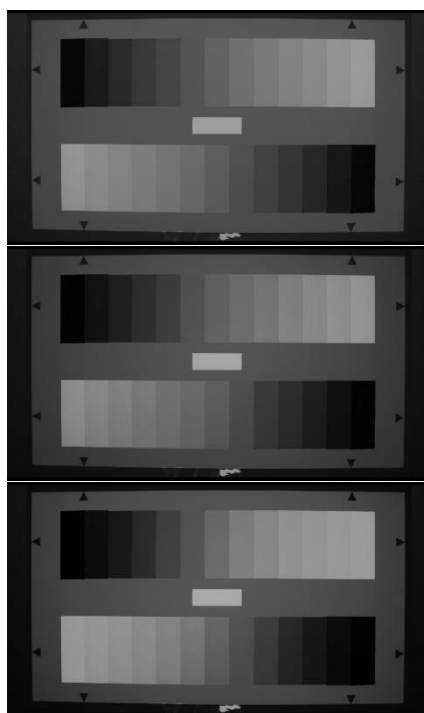
+6 Stops

+7 Stops

RED EPIC-W
Helium 8K
HDRx2 Simple Blend

Still	WFM	Stops
		-7 Stops
		-6 Stops
		-5 Stops
		-4 Stops
		-3 Stops
		-2 Stops

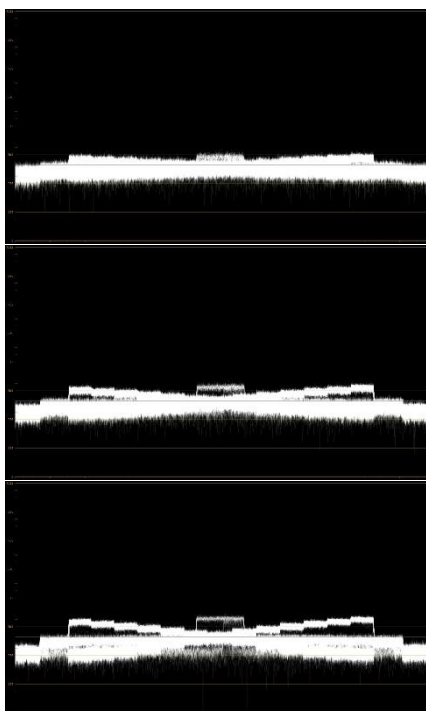
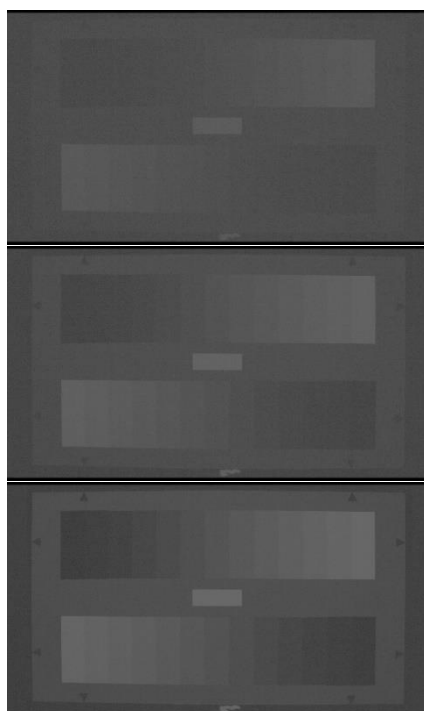




+5 Stops

+6 Stops

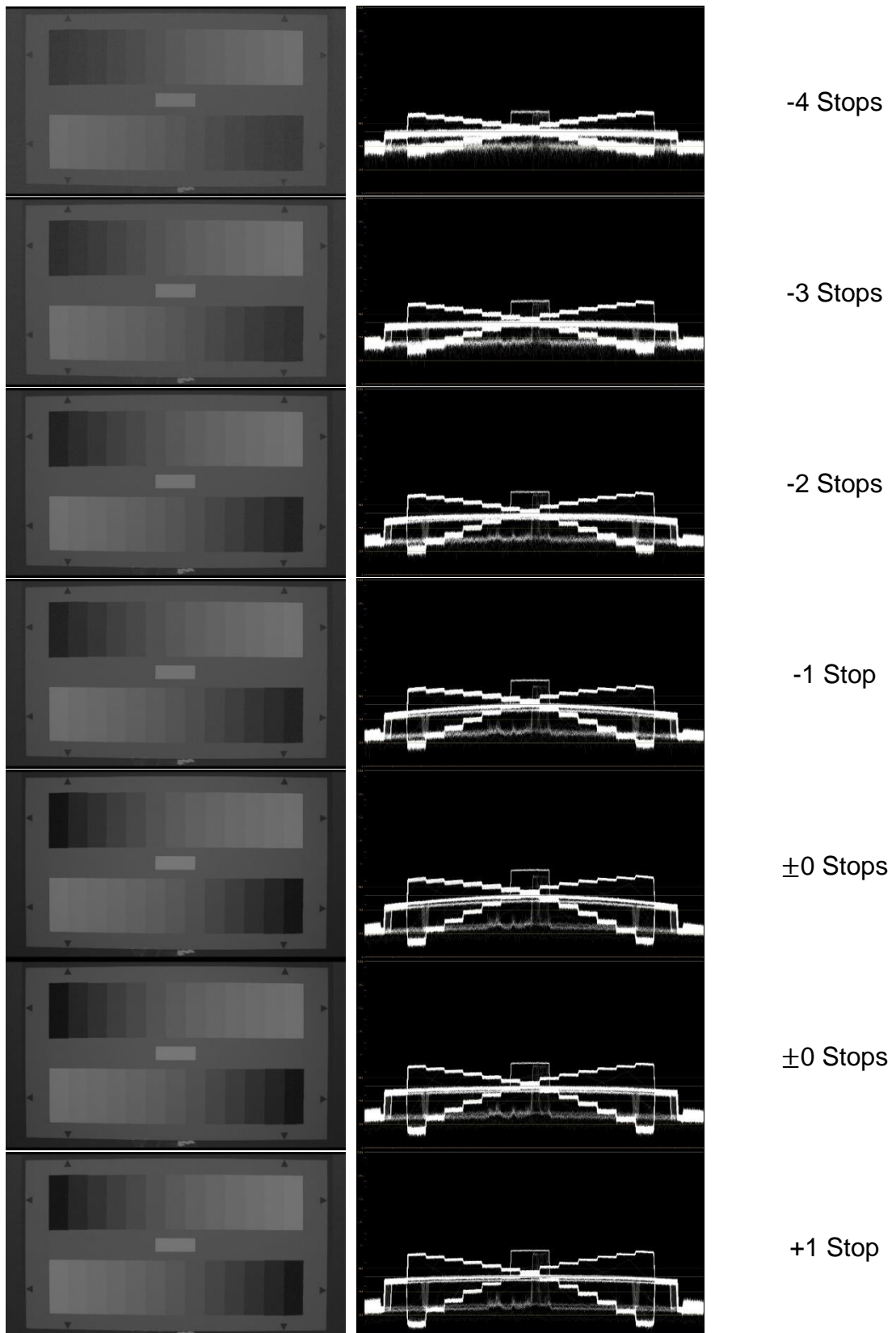
+7 Stops

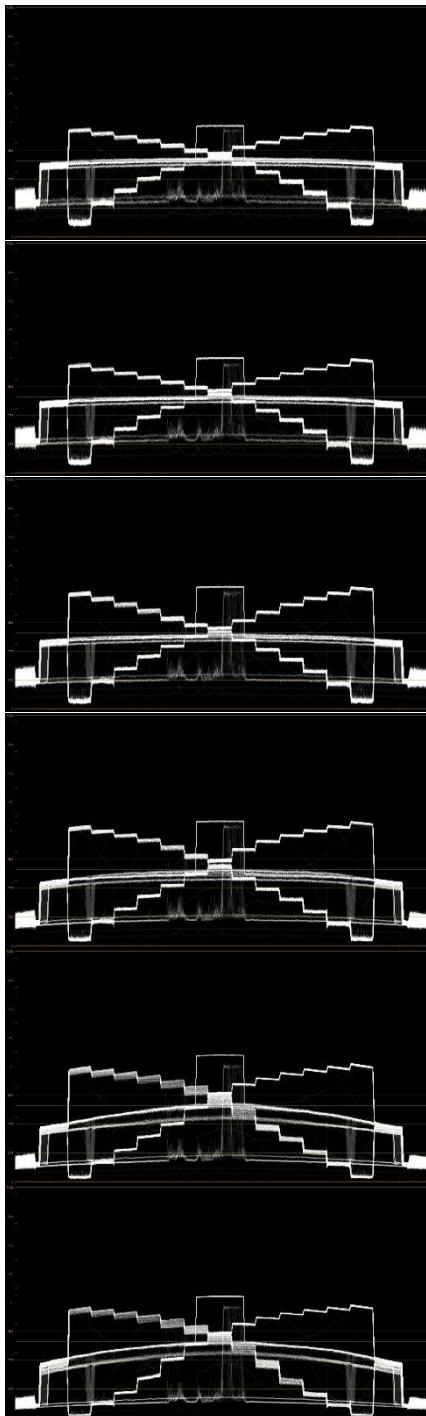
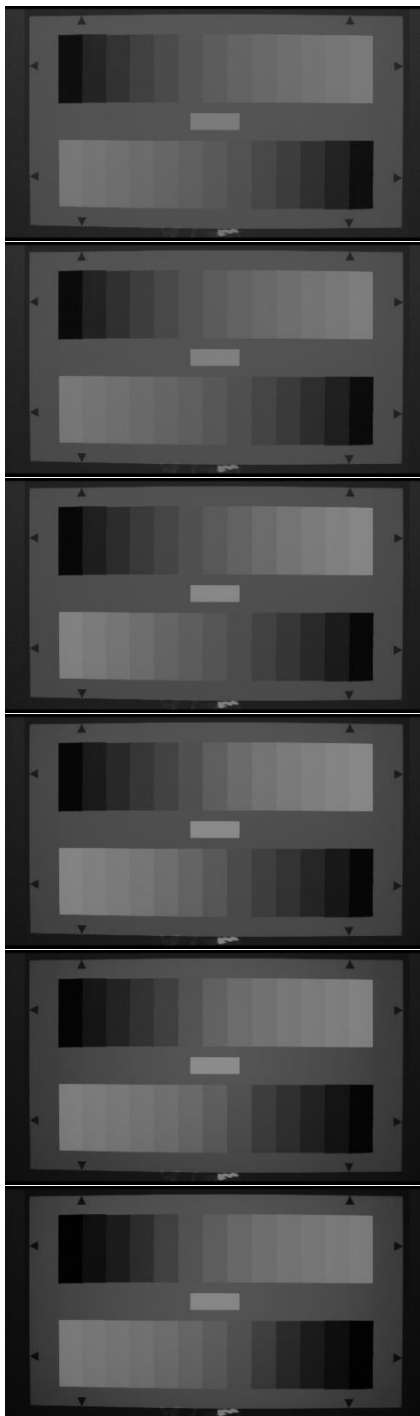
RED EPIC-W*Helium 8K**HDRx6 Simple Blend***Still****WFM****Stops**

-7 Stops

-6 Stops

-5 Stops





+2 Stops

+3 Stops

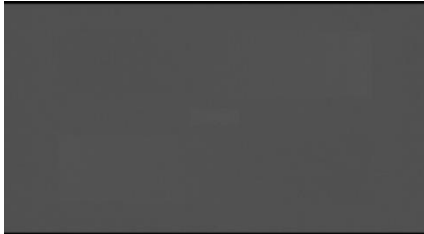
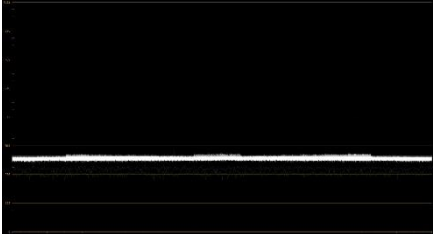

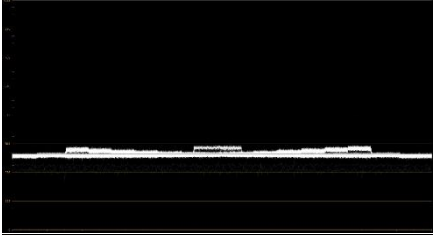

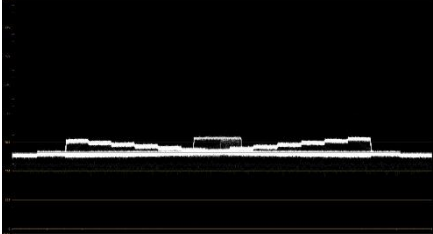

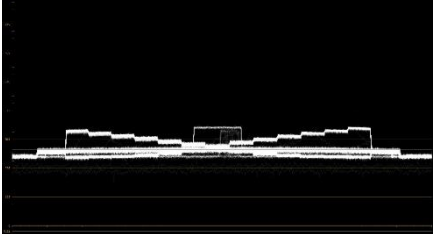
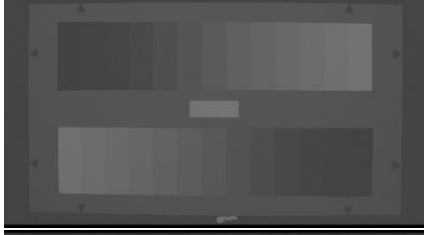
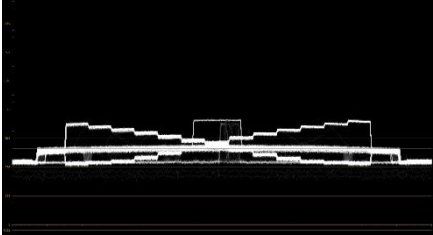

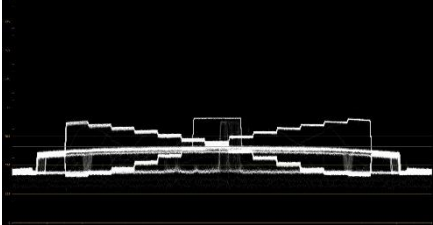
+4 Stops

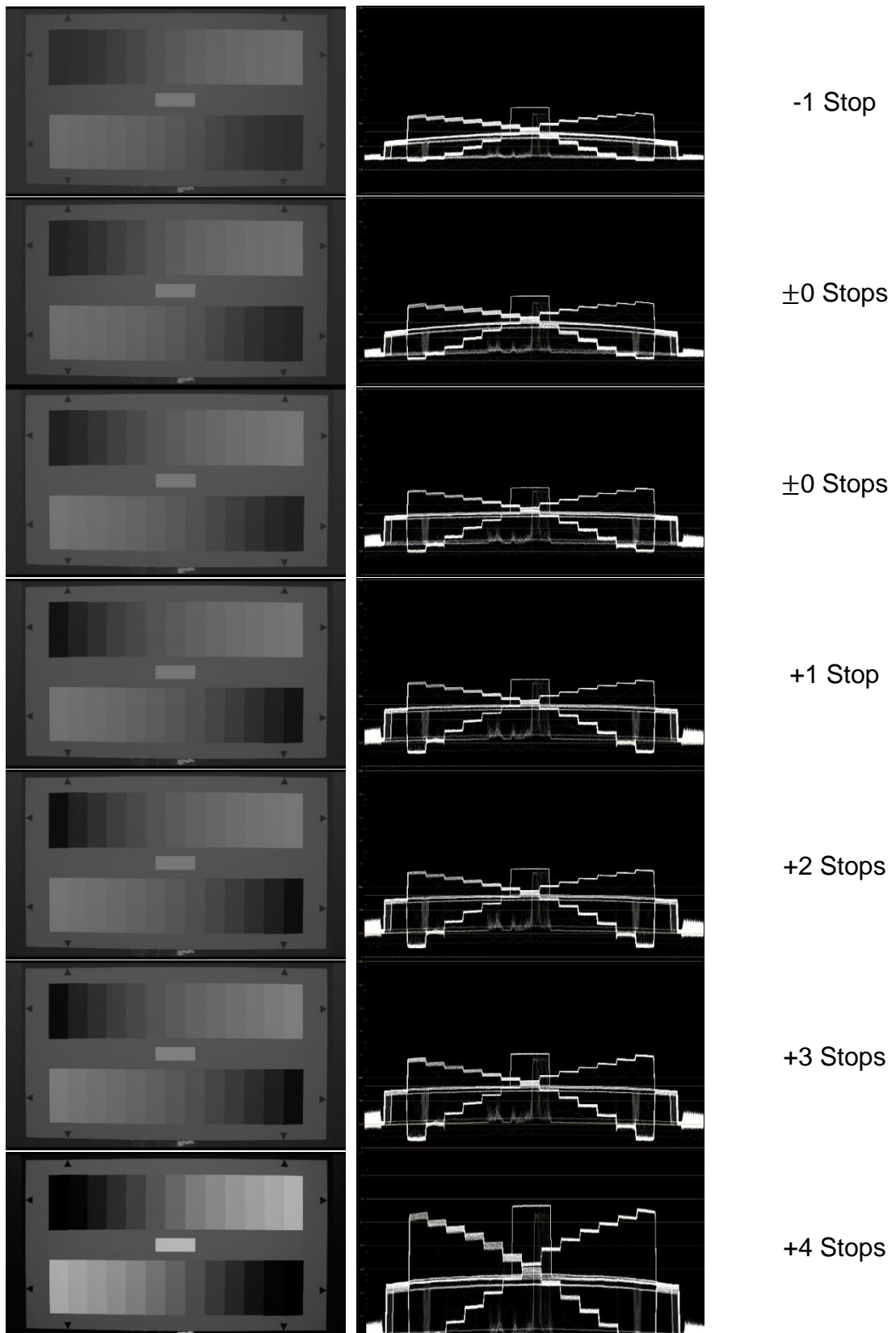
+5 Stops

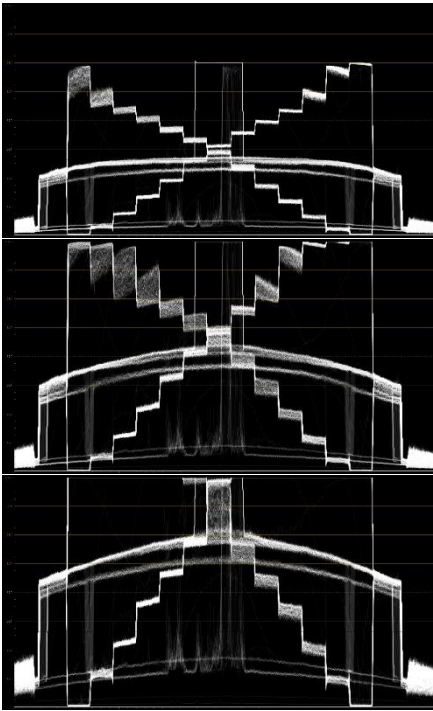
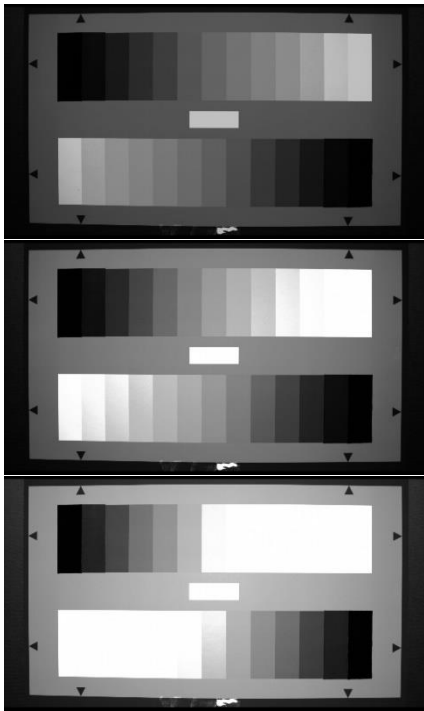
+6 Stops

+7 Stops

RED EPIC-W
Helium 8K
HDRx2 Magic Motion

Still	WFM	Stops
		-7 Stops
		-6 Stops
		-5 Stops
		-4 Stops
		-3 Stops
		-2 Stops





+5 Stops
(TIFF)

+6 Stops
(TIFF)

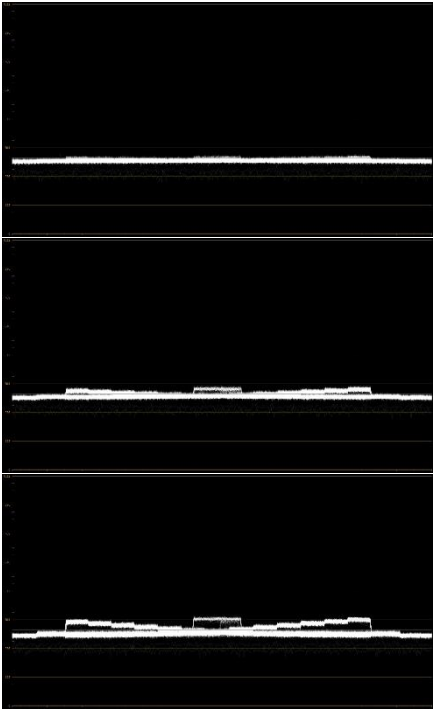
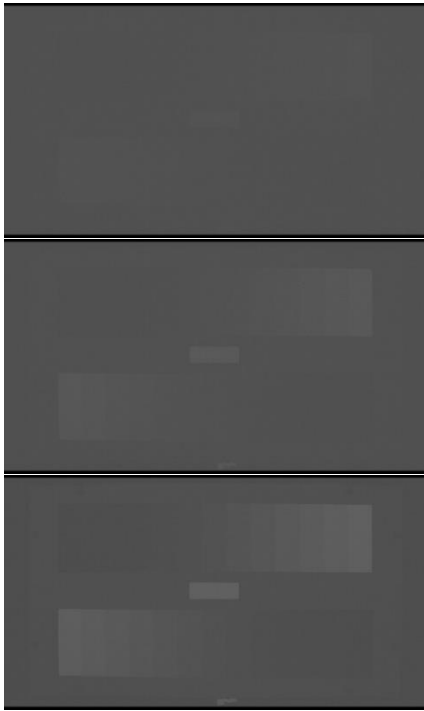
+7 Stops
(TIFF)

RED EPIC-W
Helium 8K
HDRx6 Magic Motion

Still

WFM

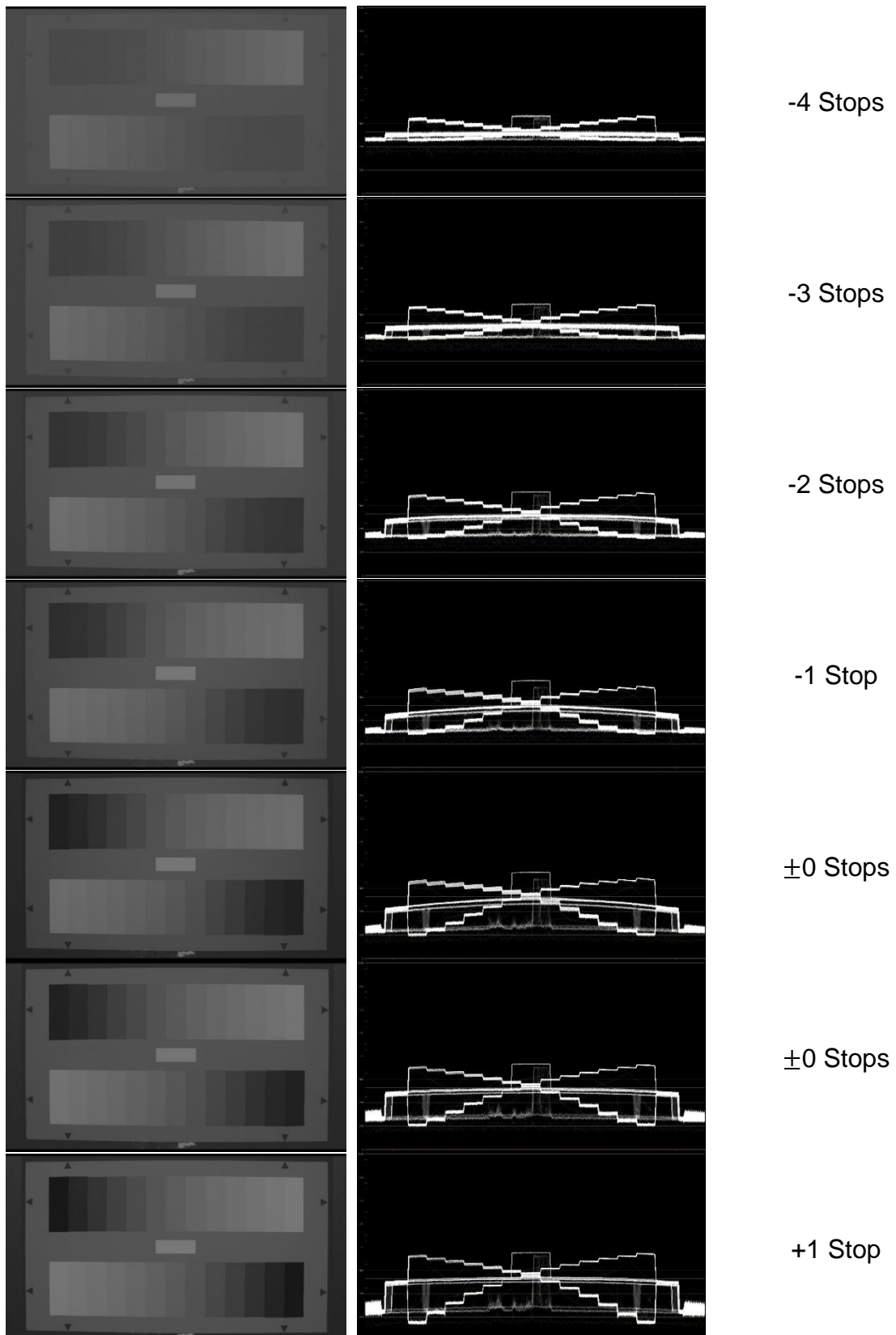
Stops

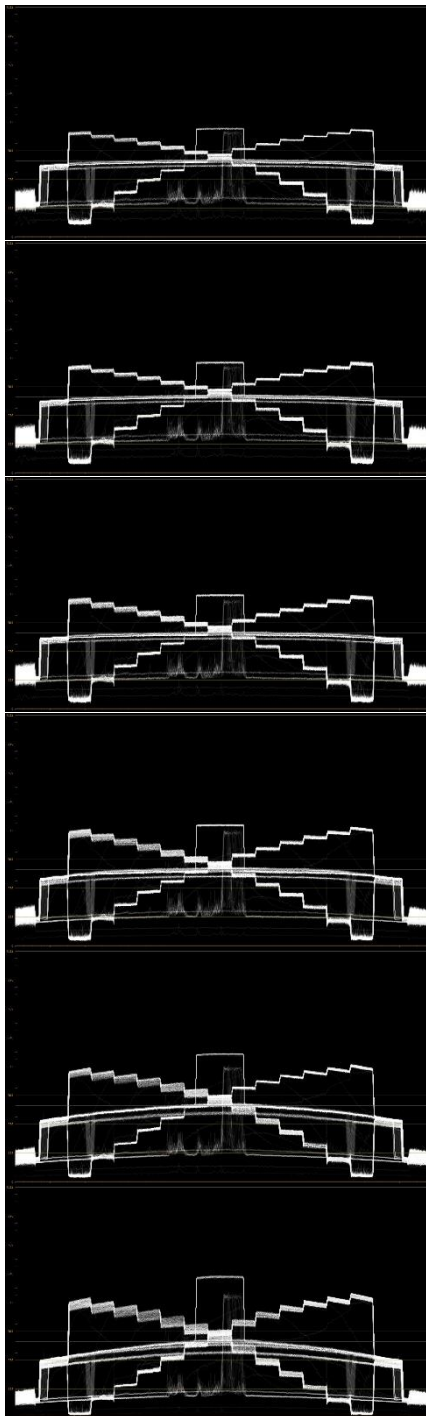
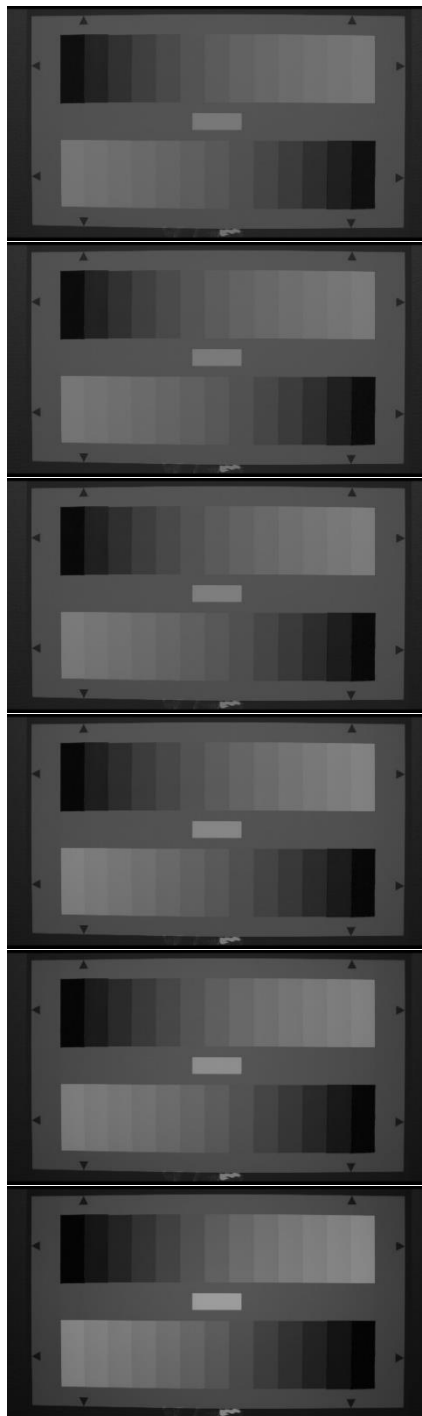


-7 Stops

-6 Stops

-5 Stops





+2 Stops

+3 Stops

+4 Stops

+5 Stops

+6 Stops

+7 Stops

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

08.02.2018

Jannis Kern